هندسه و سازه در هنر معماری

هندسه و سازه در هنر معماری

پدیدآور

دکتر مهرداد حجازی

دانشیار گروه مهندسی عمران

دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اصفهان

پژوهشکده هنرهای سنتی ـ اسلامی اصفهان

پژوهشگاه فرهنگ، هنر و ارتباطات
وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی

سرشناسه	: حجازی، مهرداد
عنوان و نام پدیدآور	: هندسه و سازه در هنر معماری/ پدیدآور مهرداد حجازی
مشخصات نشر	: تهران: پژوهشگاه فرهنگ، هنر و ارتباطات، ۱۳۹۱
مشخصات ظاهری	: ۸۳ص.: مصور (بخش رنگی)، جدول
شابک	: ۲۰۰۰۰۰ ریال: ٤-٥٧-٥٨١٨-٦٠٠-٩٧٨
وضعیت فهرست نویسی	:فیپا
موضوع	: معماری اسلامی -- ایران – ترکیب، تناسب و غیره
موضوع	: معماری ایرانی -- ترکیب، تناسب و غیره
موضوع	: هندسه در معماری
شناسه افزوده	: پژوهشگاه فرهنگ، هنر و ارتباطات
رده‌بندی کنگره	:۱۳۹۱ ۹ ه ۲٦ ح/NA 1480
رده‌بندی دیویی	:۷۲۰/۹۵۵
شماره کتابشناسی ملی	: ۲۸۰۸۹۳٦

پژوهشگاه فرهنگ، هنر و ارتباطات
وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی

هندسه و سازه در هنر معماری

ناشر: پژوهشگاه فرهنگ، هنر و ارتباطات

پدیدآور: دکتر مهرداد حجازی

ویراستار ادبی: لیلا سرتیپ‌زاده

صفحه‌آرا: حسین آذری

شابک: ٤-٥٧-٥٨١٨-٦٠٠-٩٧٨

همهٔ حقوق این اثر برای پژوهشگاه فرهنگ، هنر و ارتباطات محفوظ است.

در صورت تخلف پیگرد قانونی دارد.

نشانی: تهران، پایین‌تر از میدان ولیعصر(عج)، خیابان دمشق، شمارهٔ ۹، پژوهشگاه فرهنگ، هنر و ارتباطات

صندوق پستی ٦٤٧٤ ـ ١٤١٥٥ تلفن ۸۸۹۱۹۱۷۷ دورنگار ۸۸۸۹۳۰۷٦ Email: Nashr@ric.ir

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

سخن ناشر ۷
پیشگفتار ۹

فصل اول ـ هندسه مقدس در معماری ایرانی

مقدمه ۱۳
هندسه و معماری ۱٤
عالم نمود هندسی وحدت الهی ۱٦
۱. تصاعد هندسی ۱٦
۲. دستگاه‌های تناسبات ۱۷
۳. علوم چهارگانه ۱۸
٤. موسیقی افلاک ۱۹
۵. دستگاه تناسب‌ها بر اساس نسبت‌های موسیقی ۲۲
٦. اجسام افلاطونی ۲۳
۷. عناصر مرتبط با اجسام افلاطونی ۲۳
هندسه در طبیعت ۲٤
۱. نسبت زرین ۲۵
۲. مارپیچ‌ها ۲۹
هندسه در معماری ایرانی ۳۱
۱. هندسه در الگوها ۳۲
۲. ریاضیات الگوهای هندسی دوبعدی ۳۲
۳. ویژگی‌های مکانیکی الگوهای معماری ایرانی ۳٦
٤. ایده‌های افلاطونی در الگوهای معماری ایرانی ۳۷
۵. تحلیل هندسی بناهای تاریخی ۳۹
٦. رابطهٔ بین هندسه و ویژگی‌های سازه‌ای ٤۳

۷. طراحی بهینهٔ سازه‌های چوبی ٤٤
شکل‌گنبدهای با مصال بنایی بدون کشش و خمش ٤٤
۸. رابطهٔ بین نسبت زرین و الگوهای ترک در شکل‌های دایره‌ای ٤٧
نتیجه‌گیری ٤٩

فصل دوم ـ سازه در هنر معماری
مقدمه ٥٣
هنر و معماری سنتی ٥٥
رفتار سازه‌ای ٥٥
معیارهای طراحی ٥٦
آنالیز لرزه‌ای گنبدهای تاریخی اصفهان ٥٧
۱. توصیف گنبدهای مورد مطالعه ٥٧
۲. روش آنالیز و فرضیه‌ها ٦١
۳. گنبد تاج‌الملک ٦١
۱. ۳. آنالیز تنش ٦١
۲. ۳. آنالیز هندسی ٦٢
٤. گنبد نظام‌الملک ٦٣
٥. گنبد شیخ لطف‌الله ٦٤
٦. گنبد مسجد امام ٦٤
۷. تفسیر نتایج ٦٦
آنالیز سازه‌ای سازه چوبی ستون‌دار عمارت عالی‌قاپو ٦٧
۱. تاریخچه بنا ٦٧
۲. توصیف سازه ستون‌دار چوبی ٦٧
۳. نتایج حاصل از آنالیز و کنترل طراحی ٧٢
آنالیز سازه‌ای منارهای اصفهان ٧٣
۱. سیستم‌های سازه‌ای ٧٣
۲. آنالیز سازه‌ای منار سین ٧٦
پل خواجو ٧٨
نتیجه‌گیری ٧٩
فهرست منابع ٧١

سخن ناشر

پژوهشگاه فرهنگ، هنر و ارتباطات در راستای اهداف و وظایف خود اقدام به برگزاری نشست‌های تخصصی با موضوع‌های مختلف در حوزه فرهنگ، هنر و ارتباطات می‌نماید تا از این رهگذر فضای گفتگو و تبادل‌نظر میان نخبگان فرهنگی و هنری کشور و نقد و بررسی مسائل و مشکلات مبتلابه جامعه فراهم شود. گزارش پیش رو نتیجه نشستی است با عنوان «هندسه و سازه در هنر معماری» که با هدف بازشناسی هنرهای سنتی ـ اسلامی در اردیبهشت ماه ۱۳۹۰ با حضور آقای دکتر مهرداد حجازی و جمعی از صاحب‌نظران و مدیران فرهنگ و هنر در پژوهشکده هنرهای سنتی ـ اسلامی این پژوهشگاه برگزار شده است.

ضمن احترام به اندیشه‌ها، نظرات و دیدگاه‌های مطرح دراین مجموعه مکتوب، بدیهی است که مطالب، لزوماً منعکس‌کننده دیدگاه‌های پژوهشگاه نیست و زمینه تکمیل یا نقد آن از سوی صاحب‌نظران ارجمند وجود دارد.

پیشگفتار

معماری ایران، در تلاقی تمامی عوامل شکل‌دهنده بنا از جمله سازه، عملکرد، زیبایی، تفکر اسلامی، مباحث روان‌شناسی، جامعه‌شناختی و ... شکل می‌گیرد. در این معماری هیچ چیز یک وجهی نیست؛ هر فرمی از معماری بر اساس پاسخگویی‌اش به چند عامل انتخاب شده است. از عوامل مهم شکل‌دهنده بناهای ایرانی ــ اسلامی می‌توان از بحث سازه‌ای و ارتباط آن با هندسه و زیبایی فرمی نام برد که این دو عامل در تعامل با یکدیگر، زیباترین و پایدارترین آثار هنری از بناهای مختلف نظیر مساجد، حمام‌ها، خانه‌های مسکونی بی‌نظیر، کاروان‌سراها، بازار و ... و نیز بناهایی با کاربری‌های خاص نظیر پل‌ها، آب‌انبارها، منارها و ... را شکل داده‌اند.

بنابراین پرداختن به مبحث سازه در معماری سنتی ـ اسلامی ایران، با توجه به اینکه این بناها چندین سده به لحاظ سازه‌ای پایدار بوده‌اند و نیز توجه و بررسی هندسه آنها که در هماهنگی با سازه، زیبایی و خوشایندی فرمی و همچنین تناسب و تعادل را به ارمغان آورده است، می‌تواند به شناخت هر چه بیشتر شاهکارهای معماری این سرزمین بینجامد. شناختی که انتظار می‌رود درک اهمیت پاسداشت،

صیانت از آثار معماری گذشته و از دیگر سو ارتقاء کیفیت، کارایی و هویت‌مندی معماری معاصر ایران را به همراه داشته باشد.

متن پیش رو که حاصل نشست تخصصی با عنوان «هندسه و سازه در هنر معماری» است و در پژوهشکده هنرهای سنتی ـــ اسلامی پژوهشگاه فرهنگ، هنر و ارتباطات وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی برگزار شده، با رویکرد فوق‌الذکر، در دو فصل ساماندهی شده است؛ در فصل نخست هندسه مقدس در معماری ایرانی شامل کلیات هندسه و نیز هندسه در طبیعت و سپس در معماری ایرانی در دو بخش تزئینات و اجزای معماری و نیز در بناهای تاریخی نظیر تخت‌جمشید، گنبد تاج‌الملک مسجدجامع، ساختمان عالی‌قاپو و مسجد شیخ لطف‌الله ارائه شده و در پایان این فصل، رابطه بین هندسه و ویژگی‌های سازه‌ای در آثار معماری مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل دوم نقش سازه در هنر معماری مورد بررسی قرار گرفته است که در این بخش تعریف معماری سنتی و رفتار سازه‌ای ارائه و سپس به تجزیه و تحلیل (آنالیز) لرزه‌ای در چند اثر شامل گنبدهای تاریخی اصفهان (گنبد تاج‌الملک و نظام‌الملک مسجد جامع، گنبد مسجد جامع عباسی، گنبد مسجد شیخ لطف‌الله)، سازه چوبی ستون‌دار عمارت عالی‌قاپو، منارهای اصفهان (مشخصاً منار سین) و نیز پل خواجو و تفسیر نتایج حاصل از آنها پرداخته شده است.

در اینجا بر خود لازم می‌دانیم از مساعدت‌های آقای دکتر حمیدرضا اخوان مفرد، سرکار خانم انسیه محمودی و نیز از همکاران پژوهشکده هنرهای سنتی ـ اسلامی به‌ویژه آقایان دکتر عباس مقتدایی، محمد قاسمی و خانم‌ها شیرین داروغه، دکتر مریم قاسمی و ریحانه‌سادات سجاد که در برگزاری نشست مذکور و تدوین و چاپ این اثر همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی نمائیم.

گروه معماری

پژوهشکده هنرهای سنتی ـ اسلامی

فصل اول

هندسه مقدس در معماری ایرانی

مقدمه

در آفرینش و طراحی اشکال مختلف موجود در طبیعت می‌توان نسبت‌های معینی را مشاهده نمود. این نسبت‌ها آن دسته از روابط هندسی هستند که ریشه‌ای غیرمادی دارند و به جهت آنکه از اصول روحانی و مافوق طبیعی با اعتقاد بر مقدس بودن موضوع خود پیروی می‌کنند و دارای یک زبان نمادین و ویژگی‌های روحانی هستند، می‌توان به آنها هندسهٔ مقدس اطلاق کرد. این دیدگاه که هندسه دارای ارزش مقدس بوده، قسمتی از یک دیدگاه کلی‌تر است که در آن تمدن بشری در دوران باستان خود دارای یک منشاء روحانی و عبادی بوده است و بنابراین تاریخ استفاده از هندسهٔ مقدس توسط انسان به قرن‌ها قبل باز می‌گردد. سنت فیثاغورثی و علوم مصری و بابلی که از آنها ریشه می‌گیرد و ریاضیات ایرانی که بخشی از آن عقلانیت فیثاغورثی را به خاطر می‌آورد، بر اساس اعتقاد بر مقدس بودن مفهوم اعداد و نمادینی بودن آنها پایه‌گذاری شده‌اند. در جهان سنتی، هندسه از سایر علوم چهارگانه فیثاغورثی، یعنی حساب (عدد)، موسیقی و نجوم، تفکیک‌ناپذیر بود. هندسهٔ سنتی با ترکیب‌ها و اشکال نمادین فضا در ارتباط است. اشکال هندسی مانند مثلث، مربع و

چندضلعی‌های منتظم مختلف، مارپیچ و دایره در دورنمای سنتی، همانند اعداد سنتی، به عنوان چهره‌های کثرت در وحدت تلقی می‌شوند.

معماری خالق مکان تقدیس در طول هزاره‌ها بوده و انسان سعی کرده است به وسیلهٔ آن نوعی تجلی آسمانی را برای خود فراهم کند. معماری ایرانی همیشه بر زیبایی تأکید داشته است و ایرانیان سعی کرده‌اند در ابعاد ساختمان‌ها تناسب‌هایی را به کار گیرند که انعکاس کیهانی را بر روی زمین متجلی کنند. از طریق تحلیل هندسی بناهای تاریخی ایران، می‌توان نشان داد که از تناسب‌های مختلف مانند نسبت زرین به صورت گسترده‌ای در معماری ایرانی نظیر طراحی پلان‌ها، مقاطع، الگوهای معماری و هندسی و ویژگی‌های سازه‌ای و مکانیکی استفاده شده است.

در این فصل، مفهوم مقدس بودن هندسه و نمادینی بودن آن در سنت فیثاغورثی و وجود هندسهٔ مقدس و تناسب‌ها در اشکال مختلف حیات در طبیعت توضیح داده خواهد شد و در مورد به‌کارگیری علم هندسه در تعدادی از بناهای تاریخی ایران بحث خواهد شد.

هندسه و معماری

در فارسی و عربی، کلمهٔ *مهندس* از *هندسه* به معنای اندازه‌گیری مشتق شده است و این کلمه هم برای علم هندسه و هم برای معماری استفاده می‌شود. واژهٔ یونانی $\gamma\varepsilon\omega\mu\varepsilon\tau\rho\iota'\alpha$ (هندسه)، مرکب از $\gamma\varepsilon\omega$ – شکل ترکیبی از $\hat{\gamma}\eta$ (زمین) و $\mu\varepsilon\tau\rho\iota'\alpha$ (اندازه‌گیری) در معنی ریشه‌شناسی کلمه، به معنای هنر اندازه‌گیری زمین است.

واژهٔ *architect* (معمار) از کلمهٔ یونانی $\hat{\alpha}\rho\chi\iota\tau\varepsilon'\kappa\tau\omega\nu$ گرفته شده که خود مرکب از $\hat{\alpha}\rho\chi\iota-$ (رئیس، اصل، اولین در اعتبار یا رتبه) و $\tau\varepsilon'\kappa\tau\omega\nu$ (سازنده، صنعتگر) است؛ بنابراین، این واژه به صورت ادبی به معنای استاد سازنده و کارآموز ماهر هنر ساختمان‌سازی می‌باشد (دیکشنری انگلیسی آکسفورد[1]، ذیل واژه). از آنجایی که یک معمار به صورت ماهرانه‌ای انعکاس زیبایی الهی را در نظم جهانی بنا می‌کند، واژهٔ

1. The Oxford English Dictionary

architecture (معماری) دارای معنای نزدیکی به واژهٔ یونانی *κο'σμος* (کیهان)، هم‌زمان به معنای جهان، نظم و زیبایی و به واژهٔ *α^ι σθησις* (زیبایی‌شناسی)، ادراک توسط حواس به خصوص احساس کردن، است.

تأکید معماری ایرانی بر زیبایی بود. ایرانیان درطول قرن‌های متمادی همواره ارزش والایی برای زیبایی قائل بودند و *scientia geometiae* (علم هندسه) ابزار قدرتمندی در دست مهندس ایرانی بود که با استفاده از آن می‌توانست تناسب‌های آسمان را اندازه گیرد و بر روی زمین تعادل، هماهنگی و زیبایی بیافریند؛ زیبایی را در نظم قرار دهد. هندسه هم *scientia* (علم) و هم *ars* (هنر) بود.

یگانهٔ مطلق، هدف نهایی هنر و معماری سنتی ایرانی بود. معماری، زبانی نمادین بود که با استفاده از آن اعیان ثابته در الگوهایی بیان می‌شدند تا برای فهم بشر قابل درک باشند. از آنجایی که موضوع معماری در قلمرو روح و حکمت بود، هندسه به عنوان وسیله‌ای که با آن معماران ایرانی، سطوح و حجم‌ها را درست می‌کردند می‌بایست خود مقدس باشد.

اگر پیدا نمودن مبدأ هندسهٔ مقدس موردنظر باشد، کافی است به قدیمی‌ترین تمدن‌های شناخته‌شده بازگشت که در آنها هندسه بر طراحی ساختمان‌هایی حاکم بود که به منظور نمایش دادن ساختار تصورشدهٔ عالم وجود به عنوان قلمرو یگانهٔ مطلق در نظر گرفته شده بودند و چنین هندسه‌ای به واسطهٔ دارا بودن این فضیلت که قدرت خشنود کردن و جذب طبیعت الهی را دارد، مقدس است. والاترین نمونهٔ ساختمان، معبد گنبدی است که در شکل هندسی خود، نماد کرهٔ آسمانی در بالا است که دایره یا مربع زمینی در پایین را احاطه می‌کند.

عالم و طبیعت، والاترین تجلی حکمت الهی، خلق شده توسط یگانهٔ مطلق به عنوان یک واقعیت معقول و در نتیجه ریاضی، توسط بناهای معماری مقدس در یک زبان سحرآمیز و نمادین منعکس می‌شوند تا نظم، هماهنگی و زیبایی الهی را بیان کنند. الگوهای هندسی معین، اعداد و تناسب‌های وابسته به آنها، به عنوان مراجع مفاهیم کیهان‌شناسی، نقشی نمادین در آفرینش معماری ایفا می‌کنند.

عالم نمود هندسی وحدت الهی

۱. تصاعد هندسی

افلاطون (حدود ٤٢٧ ـ ٣٤٧ پیش از میلاد) توجه زیادی به هندسه فیثاغورث (۵۸۲ ـ ۵۰۰ پیش از میلاد) و موسیقی افلاک دارد و در کتاب خود *تیمائوس* (دوره آثار افلاطون، ١٣٦٧، ج ۲: ۵۳) آفرینش هندسی عالم را توضیح می‌دهد.

در *تیمائوس*، او این عقیده را ابراز می‌دارد که آفریننده، جهان دیدنی را شبیه به یک تصاعد هندسی آفرید. اجسام افلاطونی، پنج جسم، چهار عنصر و آسمان را تشکیل می‌دهند.

وی در *جمهوری* خود در مورد هندسه می‌نویسد:

> *[هندسه] ... شناسایی آن هستی است که هرگز دگرگون نمی‌شود و نه شناسایی هستی‌هایی که تابع زمان‌اند و گاه پدید می‌آیند و گاه از میان می‌روند، ...[هندسه] نفس را به سمت حقیقت سوق می‌دهد و در انسان روح حکیمانه می‌پروراند*(همان، ج ۳: ۳۸).

بر بالای درِ آکادمی او این کلمات نوشته شده بود؛ *ἀγεωμέτρητος μηδεὶς εἰσίτω* یعنی «آن کس که هندسه نمی‌داند نباید بدین مکان درآید» (Eves,1990: 106).

در *تیمائوس*، افلاطون نیاز به چهار عنصر را شرح می‌دهد (دوره آثار افلاطون، ١٣٦٧، ج ۲: ٦٤). اولاً،آتش به منظور دیدنی نمودن جهان و خاک به منظور مقاوم نمودن آن در برابر لمس کردن. آتش متعلق به آسمان و خاک متعلق به زمین، اینها دو عنصر نهایی هستند. او می‌نویسد: «... لازم است که طبیعت، دیدنی و قابل لمس باشد ... و هیچ چیز نمی‌تواند بدون آتش دیدنی یا بدون خاک قابل لمس باشد ...» ثانیاً، آنها به عنصر سومی به عنوان رابط نیاز دارند تا به یکدیگر بپیوندند، «... ولی به هم پیوستن دو چیز بدون مداخلهٔ چیز سومی ممکن نیست ...». ثالثاً، بهترین رابط تناسب هندسی است، «...[و] زیباترین تناسب وقتی است که در سه عدد، نسبت عدد وسطی به عدد آخر مانند نسبت عدد اول به عدد وسطی باشد،... آنها در رابطه با نسبت با یکدیگر یکسان می‌شوند». رابعاً، اجسام اصلی سه بعدی هستند و باید به وسیلهٔ اعداد سه بعدی (مکعب‌ها) نمایش داده شوند. یک رابط برای پیوند دادن دو عدد مسطح

(مربع‌ها) کافی است، ولی برای پیوند دادن دو عدد سه بعدی دو رابط لازم است،

ولی اگر بنا بود که جهان دارای عمق نباشد، یک رابط کافی بود تا اجزاء آن را با یکدیگر و خود را با آنها به هم پیوندد. اما ... قرار بر این بود که جهان به صورت جسم سه بعدی باشد و هیچ جسم سه بعدی به واسطهٔ یک رابط به هم نمی‌پیوندد، بلکه دو رابط لازم دارد.

بنابراین، آفریننده، آب و هوا را در وسط آتش و خاک قرار داد و بین آنها نسبت یکسانی را ایجاد کرد؛ به طوری که نسبت آتش به هوا مانند نسبت هوا به آب و مانند نسبت آب به خاک است.

خاک/آب = آب/هوا = هوا/آتش

به دلیل آنکه نسبت بین عناصر متوالی ثابت است، از آن یک تصاعد هندسی حاصل می‌شود.

در *تیمائوس*، افلاطون شرح می‌دهد که آنچه وجود دارد یک واحد است،

خدا، وقتی خواست که جهان را شبیه کامل‌ترین و زیباترین ذواتی که فقط در عالم تفکر جای دارند، بسازد، آن را به صورت ذات ذی‌روح دیدنی یگانه‌ای درآورد که همهٔ ذوات زنده را که بر حسب طبیعتشان با آن خویشی دارند در خود جمع دارد (دوره آثار افلاطون، ۱۳٦۷، ج ۲: ۷۱).

برای افلاطون هماهنگی و تناسب در سراسر آفرینش، خواه معماری، هنر یا موسیقی، کثرت موجودات را به حقیقت واحدی تبدیل می‌کند. ارتباط وابسته به هم و هماهنگ اجزاء درون جهان دیدنی، خود انعکاسی از ارتباط هماهنگ و مشابهی در درون جهان نادیدنی است. هماهنگی و تناسب ارتباط نزدیکی با نظم عالم دارند و بنابراین به مفهوم زیبایی‌شناسی، زیبایی و کیهانی هدایت می‌شوند. آفرینش زیبا است زیرا به طور هماهنگ و متناسبی زیبایی الهی را که آن را مطابق با آن زیبایی ساخته، منعکس می‌کند.

۲. دستگاه‌های تناسب‌ها

انتخاب و استفاده از دستگاه‌های تناسب‌ها همواره امر مهمی برای هنرمندان و معماران

بوده است. نه تنها نسبت‌های معینی مورد استفاده قرار می‌گرفتند، بلکه برخی دستگاه‌های تناسب‌ها ترجیح داده می‌شدند. بعضی از دستگاه‌های تناسب‌ها بر اساس فواصل موسیقی، بدن انسان و نسبت زرین قرار داشتند.

تناسب در هندسه، معماری، موسیقی و هنر را می‌توان گفت که«پیک رابطهٔ هماهنگ بین اجزاء و بین هر جزء و کل مجموعه» است. «ویتروویوس[1]» (۷۰ ـ ۲۵ پیش از میلاد)، معمار و مهندس رومی، در *۱۰ کتاب در باب معماری*(۱۹۶۰: ۱۰۸)، قدیمی‌ترین کتاب موجود در این موضوع، می‌نویسد:

> *تقارن یک مطابقت مناسب بین اجزاء خودکار و رابطهٔ بین اجزاء مختلف و تمام مجموعهٔ کلی، در مطابقت با یک جزء معین که به عنوان معیار انتخاب شده است، می‌باشد* و سپس *بنابراین از آنجایی که طبیعت، بدن آدمی را به گونه‌ای متناسب کرده است که اجزاء آن کاملاً متناسب با بدن به عنوان یک مجموعه می‌باشند، ... در ساختمان‌های کامل اجزاء مختلف باید* دارای نسبت‌های متقارن دقیقی *نسبت به کل طرح باشند.*

منظور ویتروویوس از نسبت‌های متقارن، تناسب‌های یکسان است. از طریق دستگاه‌های تناسب‌هاست که همهٔ اجزاء به صورت هماهنگ دارای پیوستگی بین یکدیگر و در ضمن با کل مجموعه هستند و بنابراین یک طرح خوشایند و عمل‌کننده فراهم می‌شود.

۳. علوم چهارگانه

تقسیم ریاضیات به چهار گروه، به زمان فیثاغورث باز می‌گردد. علوم چهارگانه (*Quadrivium*)، حساب (عدد)، هندسه (به عنوان عدد در فضا)، موسیقی (یا هم آهنگی به‌عنوان عدد در زمان) و نجوم (یا کیهان‌شناسی به عنوان عدد در زمان و فضا)، همان‌طوری که افلاطون اشاره می‌کند، وسیله‌ای بودند برای مطالعهٔ $\sigma o \phi \iota \alpha$، والاترین نوع دانش، یعنی حکمت. تمرین علوم چهارگانه، تمرین عدد، شکل، صوت و حرکات سیاره‌ها در آسمان است.

---

1. Vitruvius

٤. موسیقی افلاک

در تیمائوس، افلاطون این عقیده را ابراز می‌کند که نفس جهان ترکیب و واسطهٔ بین ذات لایتغیر جهان متافیزیکی و وجود متغیر جهان فیزیکی است(دوره آثار افلاطون، ١٣٦٧، ج ٢: ٨٩). این نفس، ایجاد واسطه، توسط آفریننده، به زیربخش‌هایی متناسب و هم آهنگ تقسیم شده است و به صورت یک نوار بلند شکل داده شده است. آنگاه این نوار به قسمت‌هایی تقسیم شد.

او[آفریننده] یک قسمت از کل را جدا کرد و کنار گذاشت	۱
و سپس قسمت دیگری را دو برابر قسمت اول	۲
قسمت سومی سه برابر اولی	۳
قسمت چهارمی دو برابر دومی	٤
قسمت پنجمی سه برابر سومی	۹
قسمت ششمی هشت برابر اولی	۸
قسمت هفتمی بیست و هفت برابر اولی	۲۷

هفت عدد صحیح به‌دست آمده؛ ۱، ۲، ۳، ٤، ۸، ۹ و ۲۷، از واحد، مبدأ همهٔ اعداد، اولین عدد زوج و اولین عدد فرد و مربع‌ها و مکعب‌های آنها تشکیل شده‌اند. آنها را می‌توان به صورت دو تصاعد مرتب کرد؛ تصاعد هندسی از ۲(چپ) و تصاعد هندسی از ۳ (راست):

واحد			۱				نقطه
اولین عدد زوج و اولین عدد فرد		۳		۲			خط
مربع‌ها			۹		٤		سطح
مکعب‌ها	۲۷					۸	جسم

این لاندای افلاطون نامیده می‌شود، زیرا شبیه حرف یونانی λ است.

بی‌درنگ پس از تشریح لاندا، افلاطون نشان می‌دهد که ضرب ۲ و ۳ همهٔ اعداد در دستگاه موسیقی فیثاغورثی با ضرب متوالی در پنجم‌ها (۳/۲) حاصل می‌شود. او از یک میانگین حسابی و یک میانگین هم‌آهنگ برای تولید عدد در هشتم‌ها، چهارم‌ها و پنجم‌های مسلسل موسیقی استفاده می‌کند. در واقع، در موسیقی با افزودن میانگین‌های حسابی و

هم‌آهنگ بین دو نهایت نسبت‌های دوگانه، هشتم‌های دوگانه، حاصل می‌شوند و تصاعد موسوم به تناسب موسیقی، یعنی ۱، ٤/۳، ۳/۲ و ۲ که به ترتیب نشان‌دهندهٔ فرکانس‌های بنیادی، چهارم، پنجم و هشتم است را به دست می‌دهد؛ برای مثال، برای اولین فاصله

میانگین حسابی = (۱+۲)/۲ = ۳/۲

میانگین هم‌آهنگ دو عدد برابر است با معکوس میانگین حسابی معکوس‌های آنها. برای ۱ و ۲، معکوس‌ها برابر ۱ و ۱/۲ هستند که میانگین حسابی آنها ۲÷ (۱/۲ + ۱) یا ۳/٤ می شود. بنابراین،

میانگین هم‌آهنگ = ٤/۳

با در نظر گرفتن فاصلهٔ بین چهارم(٤/۳) و پنجم(۳/۲) به عنوان یک پردهٔ کامل

۳/۲ ÷ ٤/۳ = ۳/۲ × ۳/٤ = ۹/۸

افلاطون آنگاه گام را با فواصل ۹/۸، پرده، پر می‌کند؛ بنابراین، از این فواصل تنها یک قسمت با فاصلهٔ ۲۵٦/۲٤۳، نیم‌پرده، باقی می‌ماند.

افلاطون گام موسیقی را با محاسبه‌های حسابی تولید کرد و نه با تقسیم سیم مرتعش بر اساس تناسب‌های مختلف آنگونه که فیثاغورثیان عمل کردند.

اعتقاد بر این است که فیثاغورثیان گام موسیقی را با آزمایش بر روی یک سیم کشیده شده همراه با یک خرک متحرک ساختند. برای یک سیم که به دو قسمت مساوی تقسیم شده میانگین هم‌آهنگ بین ۱/۲ و ۱ برابر ۲/۳، پنجم موسیقی است و میانگین حسابی بین ۱/۲ و ۱ برابر ۳/٤، چهارم موسیقی است. این تصاعد ۱، ۳/٤، ۲/۳، ۱/۲ را به‌دست می‌دهد. آنها عبارت‌اند از:

هشتم	۱/۲ یا ۸/۱٦
پنجم	۲/۳ یا ٤/٦
چهارم	۳/٤ یا ۹/۱۲

در مقایسهٔ این دو تصاعد، معکوس بودن نسبت‌ها و در موقعیت مخالف قرار داشتن میانگین‌های حسابی و هم‌آهنگ روشن است (جدول ۱) (لولر، ۱۳٦۸: ۹۷).

جدول ۱. مقایسهٔ بین تناسب‌های موسیقی از دیدگاه ارتعاش و طول سیم)

ارتعاش	نت	میانگین هم‌آهنگ (چهارم)	میانگین حسابی (پنجم)	هشتم
	۱	٤/۳	۲/۳	۲
	٦	۸	۹	۱۲
طول سیم	۱۲	۹	۸	٦
	۱	۳/٤	۳/۲	۱/۲
	نت	میانگین حسابی (چهارم)	میانگین هم آهنگ (پنجم)	هشتم

نزد فیثاغورثیان منظومهٔ شمسی از ۱۰ سیاره تشکیل شده بود که در مدارهای دایره‌ای دور یک آتش مرکزی می‌چرخیدند. سیاره‌ها بر حسب فاصله‌شان از مرکز، اصوات هم‌آهنگ تولید می‌کردند. فواصل بین سیاره‌ها مطابق تقسیم‌ها، یک سیم کشیده شده بود. این ***Musica Mundana*** نامیده می‌شد، که معمولاً به موسیقی افلاک ترجمه می‌شود. اصوات تولیدشده به‌قدری لطیف هستند که گوش‌های معمولی قادر به شنیدن آن نیستند. این موسیقی در همهٔ سیکل‌ها و ریتم‌های طبیعت مانند دوره‌های زیست‌شناسی، فصول و حرکات سیاره‌ها حاضر است. در *جمهوری* در *افسانهٔ ار*[1] افلاطون با احترام به فیثاغورث دربارهٔ کیهان می‌نویسد:

بر بالای هر یک از دایره‌های آن سیرنی[2] *(موجودی که سر زن و تن مرغ دارد) ایستاده بود که با گردش‌های آن می‌گردیدند و از هریک صدایی به گوش می‌رسید و*

1.Er
2. Sirena

صداها چنان با یکدیگر هماهنگ بودند که از ترکیب آنها آهنگی موزون پدید می‌آمد.

و وی، در *تیمائوس*، توضیح می‌دهد که مدارهای آسمان مطابق نسبت‌های موسیقی تقسیم شده‌اند. در آنجا او تشکیل مسیرهای دایره‌ای برای ستارگان توسط آفریننده را شرح می‌دهد:

شکلی را که به این نحو پدید آمده بود از درازا برید و به دو قسمت تقسیم کرد و این دو قسمت را از وسط صلیب‌وار به هم بست به طوری که آن دو با هم شکل X را به وجود آورند. سپس هر یک از آن دو را خم کرد و به شکل دایره درآورد و در نقطهٔ مقابل تقاطعشان هر یک را با خود و هردو را با یکدیگر به هم بست ...از این دو دایره یکی دایرهٔ بیرونی و دیگری دایرهٔ درونی گردید (دوره آثار افلاطون، ۱۳٦۷، ج ۲: ۱۰۳).

«کپلر» (۱٦۳۰–۱۵۷۱ میلادی) در *هارمونی جهانی*(۱۹۹۵: ۱۸٦) می‌نویسد که آرزو می‌کند:

بنای شکوهمند دستگاه هم‌آهنگ گام موسیقی را بنا کند ... همان‌گونه که خدا، خود آفریننده، آن را در هماهنگ کردن حرکات آسمانی بیان کرده است و سپس، من می‌پذیرم که هیچ صوتی به خارج پخش نمی‌شود، ولی به طور قطع می‌گویم ... که حرکات سیارات بر اساس تناسبات هم آهنگ تنظیم شده است.

۵. دستگاه تناسب‌ها بر اساس نسبت‌های موسیقی

معمار رنسانس «لئون باتیستا آلبرتی»[1] (۱٤۷۲ ـ ۱٤۰٤ میلادی) در ۱۰ *کتاب معماری* می‌نویسد:

[من] از حقیقت گفتهٔ فیثاغورث متقاعد شده‌ام، که طبیعت بی‌تردید به صورت سازگار عمل می‌کند ... من نتیجه می‌گیرم که همان اعدادی که توسط آنها مطابقت اصوات بر گوش‌های ما تأثیر خوش می‌گذارد، همان‌ها به چشم‌ها و ذهن‌های ما نیز لذت می‌بخشند. (1987: 239)

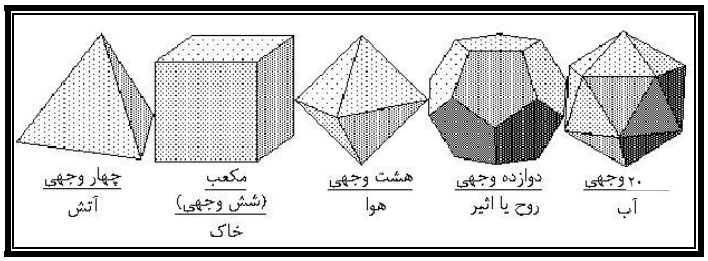
این در موافقت با عقیدهٔ افلاطون است که آن نسبت‌هایی که برای گوش خوشایند هستند برای چشم نیز خوشایند می‌باشند. بنابراین نسبت‌های موسیقی رابطهٔ نزدیکی با هنر یا معماری

1. Leon Battista Alberti

دارند و آنها را می‌توان به عنوان اساس طرح‌های هنری در نظر گرفت.

٦. اجسام افلاطونی

در *تیمائوس*، افلاطون روشی را که آفرینندهٔ الهی از آن طریق جهان دیدنی را ساخت شرح می‌دهد. پنج عنصر به اجسام بنیانی که اجسام افلاطونی نامیده می‌شوند، نسبت داده می‌شوند. اینها تنها چند وجهی‌های منتظم ممکن هستند که وجوه آنها، چندضلعی‌های منتظم و یکسان می‌باشند: چهار وجهی با چهار وجه به شکل مثلث متساوی‌الاضلاع، مکعب با شش وجه مربع شکل، هشت وجهی با هشت وجه به شکل مثلث متساوی‌الاضلاع، ۱۲ وجهی با ۱۲ وجه به شکل پنج ضلعی منتظم و ۲۰ وجهی با ۲۰ وجه به شکل مثلث متساوی‌الاضلاع (شکل ۱).



شکل ۱. اجسام افلاطونی

۷. عناصر مرتبط با اجسام افلاطونی

افلاطون، در *تیمائوس* ، نشان می‌دهد که عناصر بنیانی جهان، خاک، هوا، آتش و آب هستند. او چهار عدد از اجسام افلاطونی را با چهار عنصر مربوط می‌کند؛ مکعب با خاک، ۲۰ وجهی با آب، چهار وجهی با آتش و هشت وجهی با هوا.

> *اکنون می‌خواهیم چهار شکلی [اجسامی] را که با بیان خود تشریح کردیم میان چهار عنصر، یعنی آتش و خاک و آب و هوا تقسیم کنیم ... خاک دارای شکل مکعب است؛ زیرا در میان اجسام چهارگانه از همه بی‌حرکت‌تر است و جسمی که دارای چنین خاصیتی است به ناچار باید بر پایه و قاعدهٔ استوارتری قرار گرفته باشد، سنگین‌ترین آنها (۲۰ وجهی) را به آب نسبت می‌دهیم، سبک‌ترینشان (چهار وجهی) را به آتش و میانگین*

(هشت وجهی) را به هوا (دوره آثار افلاطون، ۱۳٦۷، ج ۳: ۹۱).

افلاطون راجع به یک شکل پنجم معین که توسط آفریننده در آفریدن جهان استفاده شده است می‌نویسد، «هنوز یک شکل پنجم باقی می‌ماند که خدا از آن برای آراستن صور فلکی روی همهٔ آسمان استفاده کرد». منظور او از آراستن صور فلکی، ظرف یاکل است که ۱۲ وجهی با ۱۲ وجه است که هر وجه به صورت یک پنج ضلعی منتظم می‌باشد. ۱۲ وجه به منطقه البروج و کل کیهان ارتباط دارد. *نسبت زرین*، بر شکل پنج ضلعی حاکم است که برای فیثاغورثیان نماد به وجود آوردن کیهان، روح یا اثیر است. بنابراین، ۱۲ وجهی مرتبط با عنصر پنجم اثیر یا آسمان یا کیهان بود (شکل ۱).

هندسه در طبیعت

در طبیعت، فرایند اشکال را در غالب ساختارهای هندسی و تناسب‌ها، می‌توان در کوچک‌ترین ذرات تا کهکشان‌ها پیدا کرد. در کوچک‌ترین ذره نیز راز هستی به شکلی خارق‌العاده نهفته است و در آن تمامی خصوصیات کهکشان جای داده شده است. حیات با شکل‌های هندسی درهم آمیخته است، زوایای پیوستگی‌های اتمی در مولکول‌ها، شکل کروی سلول که خود با یک تصاعد هندسی از یک به دو به چهار به هشت و تعداد بیشتری مولکول توسعه می‌یابد، مارپیچ‌های DNA و الگوهای شبکه‌ای کریستال‌ها از بارزترین نمونه‌های آن است.

هندسه، تمرین اشکال از طریق اندازه‌گیری و روابط بین آنهاست که به وسیلهٔ آن هر شکل می‌تواند از یک شکل پیشین، یعنی صور نوعی هندسی، آشکار شود. همچنان‌که افلاطون بیان کرد، حقیقت از اعیان ثابته یا ذات مطلق، ساخته شده که جهان دیدنی تنها یکی از انعکاس‌های آن است. حواس انسان نمی‌توانند این قلمرو متافیزیکی را درک کنند. هندسه از اشکال دیدنی استفاده می‌کند تا این اعیان ثابته را توضیح دهد. هندسهٔ مقدس، یگانگی نهفته در همهٔ اشکال هندسی و ارتباط جدانشدنی جزء با کل را پدیدار می‌کند و بدین‌گونه تبلور وحدت و مبنای مقدس همه مخلوقات است.

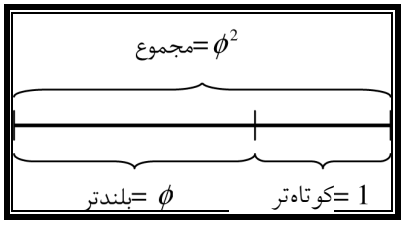
آلبرتی در *۱۰ کتاب معماری*، زیبایی طبیعی اشکال را توضیح می‌دهد و معتقد است که زیبایی مطابقت اجزاء تشکیل‌دهنده با *قانون طبیعت* است: «مردم باستان ... اصولاً در کارهایشان تقلید از طبیعت را به عنوان بزرگ‌ترین هنرمند در همهٔ اقسام ترکیبات، در نظر داشتند» (1987: 327). برای آلبرتی، قانون طبیعت قانون تناسب‌ها و تطابق همه جانبهٔ اجزاء در درون همهٔ طبیعت است.

> ... *قانون این تناسب‌ها به بهترین نحو در ترکیباتی استنباط می‌گردد که در آنها مشخص می‌شود که طبیعت خود کامل‌ترین و قابل تحسین‌ترین عناصر است ... طبیعت بی‌تردید به صورت سازگار عمل می‌کند و در همهٔ فعالیت‌هایش یک تناسب ثابت وجود دارد.*

۱. نسبت زرین

نسبت زرین (که تناسب زرین، میانگین زرین، نسبت الهی، تناسب الهی، برش مقدس، یا به سادگی (نسبت) ϕ نیز نامیده می‌شود) یک نسبت مافوق عقلی یا متعالی است که در اشکال بنیادی پیدا می‌شود: گیاهان، گل‌ها، ویروس‌ها، DNA، صدف‌ها، سیاره‌ها و کهکشان‌ها. این نسبت معمولاً با حرف یونانی ϕ نشان داده می‌شود که این به خاطر فیدیاس[1] (حدود ۵۰۰-۴۳۲ق.م)، مجسمه‌ساز آتنی و مدیر هنری ساخت پارتنون[2] که اعتقاد بر این است که از نسبت زرین در کارش استفاده کرد. گرچه نسبت زرین قبل از هرچیز یک تناسب است و نه یک عدد، از نظر کمی برابر $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ تقریباً مساوی ۱/۶۱۸ می‌باشد. نسبت زرین، نسبت منحصر به‌فرد دو قسمت است وقتی که نسبت قسمت بزرگ‌تر به قسمت کوچکتر مساوی نسبت قسمت کوچکتر به علاوهٔ قسمت بزرگ‌تر به قسمت بزرگ‌تر است (شکل ۲). این نسبت نماد تولد دوباره و تصاعد و بسط از واحد بوده چون هر تولد مرتبط با وجود قبل از خود است. نسبت زرین تقسیم کامل واحد است.

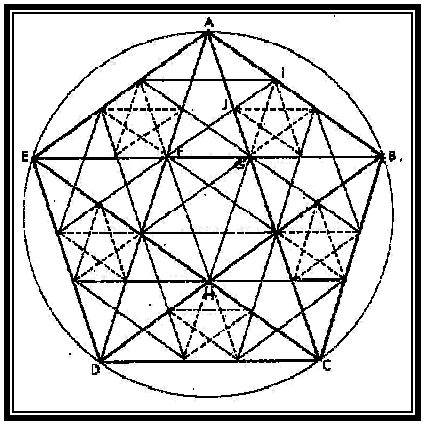
1. Phidias
2. Parthenon



شکل ۲. نسبت زرین

نسبت زرین دارای ویژگی‌های منحصر به‌فردی است:

- $\phi = 1+1/(1+1/(1+1/(1+1/(1+1/(1+1/\ldots)))))\ldots$
- $\ldots;(1/\phi)+1=\phi;\ 1+\phi=\phi^2;\ \phi+\phi^2=\phi^3;\ \phi^2+\phi^3=\phi^4$
- نسبت قسمت‌ها در پنج ضلعی و پنج‌رأسی (ستارهٔ پنج پر) که برای افلاطون و فیثاغورث مقدس بودند (شکل ۳). ۱۲ وجه جسم افلاطونی ۱۲ وجهی (شکل ۱) به شکل پنج‌ضلعی هستند که شامل نسبت زرین است، به همین دلیل افلاطون این شکل را معادل کیهان در نظر گرفت. در هر پنج رأسی هر قسمت بزرگ‌تر(یا کوچک‌تر) مرتبط با نسبت ϕ است، به‌طوری که یک‌سری توانی از نسبت زرین با توان‌های متوالی صعودی (یا نزولی) به صورت خودکار تولید می‌شود: $\ldots, \phi^5, \phi^4, \phi^3, \phi^2, \phi$.
- قاعدهٔ کلی بدن انسان از نسبت زرین تشکیل شده است.



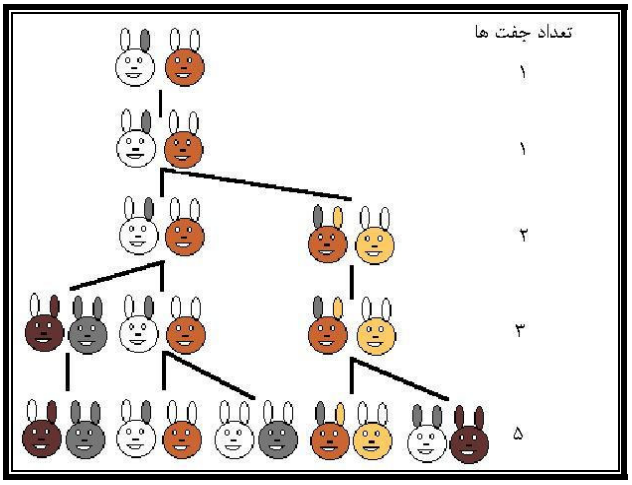
شکل ۳. نسبت زرین در پنج ضلعی و پنج رأسی

$$AB=1\ ,\ \ EG=FB=1\ ,\ \ EB=\phi(1.618)\ ,\ \ GB=\phi-1=1/\phi(0.618)\ ,$$
$$GI=FG=1-1/\phi(0.382)\ ,\ \ FG=1/\phi^2(0.382)\ ,\ \ JG=1/\phi^3(0.236)$$

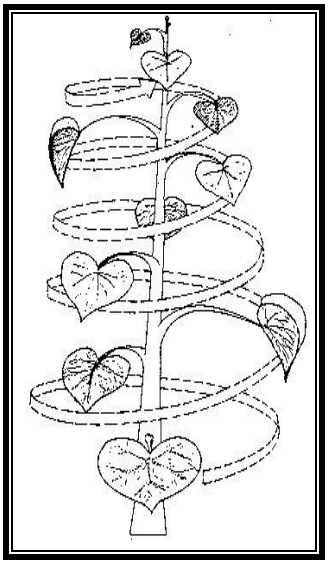
– ϕ = نسبت جزءهای مجاور در سری فیبوناچی[1] وقتی کـه در بـی‌نهایـت محاسـبه شود. سری فیبوناچی یک مجموعه از اعداد است که با ۱ و ۱ شروع مـی‌شـود و هـر جـزء بعدی مساوی مجموع دو جزء قبلی اسـت، یعنـی ... ۱٤٤، ۸۹، ۵۵، ۳٤، ۲۱، ۱۳، ۸، ۵، ۳، ۲، ۱، ۱. سری فیبوناچی (ریاضی‌دان ایتالیایی، ۱۲٤۰–۱۱۷۰م) در نسبت تعداد قسمت‌های مارپیچ در گل آفتاب‌گردان، در تسلسل تاریخی تعداد جمعیت‌های خرگوش (شکل ٤)، در ترتیب قرارگیری برگ‌های دور یک شاخه (شکل ۵) و خیلی جاها در طبیعت که الگوهـای خودجوش در حال فعالیت هستند، یافت می‌شود. رابطهٔ بین دو عدد متوالی از این سری به سمت ϕ میل می‌کند.

نسبت زرین ϕ خوشـایندترین تناسـب زیبـایی‌شناسـی اسـت. در طـول تـاریخ هنـر و معماری، هنرمندان سنتی نسبت الهی را به عنوان اندازهٔ مقـدس و تناسـب زیبـایی‌شناسـی اختیار کردند تا روح را در ماده مجسم کنند. این نسبت در هرم بزرگ در مصر وجـود دارد (شکل ٦). یونانیان الوهیت را در معبد دل‌فـی جسـتجو مـی‌کردنـد. فیثـاغورث در معابـد مدرسهٔ رازآموزی مصر در شهر باسـتانی *فـی*–لا–دل–*فـی*–ا[2] وارد شـد. طـرح پـارتنون در آکروپولیس[3] نزدیک آتن در طراحی توسط مستطیل زرین احاطه مـی‌شـود و شـامل تعـداد زیادی مستطیل زرین است (شکل ۷).

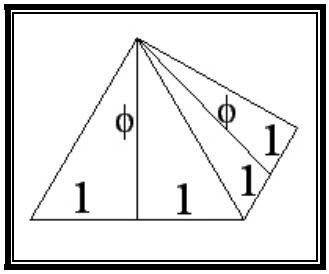
1 . Fibanacci Series
2. Philadelphia
3. Acropolis



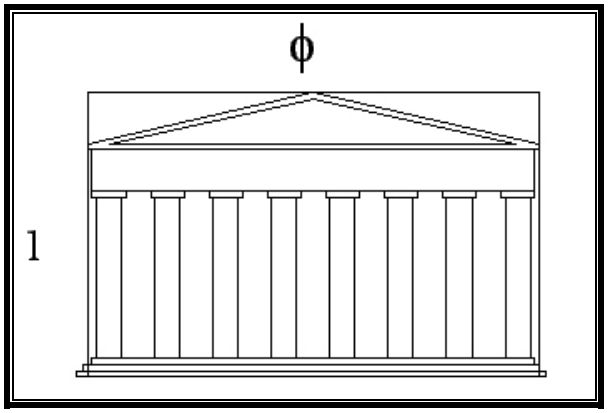
شکل ٤. سری فیبوناچی در تسلسل تاریخی تعداد جمعیت‌های خرگوش



شکل ۵. سری فیبوناچی در توزیع برگ‌ها در اطراف یک شاخهٔ مرکزی: ۳ برگ در ۵ دور، ۵ برگ در ۸ دور



شکل ٦. هرم بزرگ و نسبت زرین



شکل ۷. پارتنون، نسبت زرین

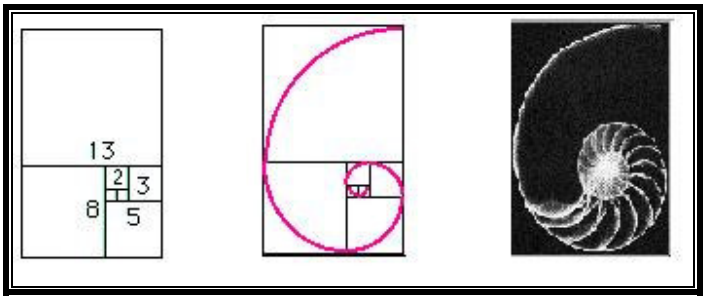
۲. مارپیچ‌ها

به عنوان یک واقعیت ریاضی، تمام شکل‌هایی که به‌گونهٔ فراگستر رشد می‌کنند، تقاطع‌هایی را به وجود می‌آورند که بر اساس آن مارپیچ‌ها می‌توانند ساخته شوند. مارپیچ ایجاد شده توسط یک شبکهٔ تکرارشونده از مستطیل‌های زرین (مستطیل‌هایی با اضلاع با طول نسبی ۱ و ϕ یا جزءهای متوالی در سری فیبوناچی) را می‌توان در محل‌های بی‌شماری در طبیعت یافت؛ در یک مار حلقه شده، در تنهٔ فیل، در پیچ و خم لایهٔ داخلی گوش و در شکل صدف نوتیلوس پومپیلیوس[1]، که برای آنها تناسب‌های یکسانی برای هر قسمت که اضافه می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۸).

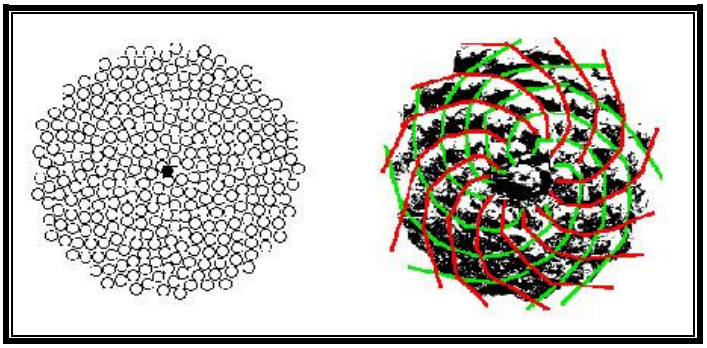
1. Nautilus pompilius

این مارپیچ در الگوهای رشد بسیاری از گیاهان وجود دارد. برای مثال، در گل آفتاب‌گردان توزیع دانه‌ها بر اساس مارپیچ های میانگین زرین است. تعداد ۵۵ مارپیچ در جهت حرکت عقربه‌های ساعت روی تعداد ۳٤ یا ۸۹ مارپیچ در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت قرار گرفته‌اند که این اعداد متعلق به سری فیبوناچی می‌باشند (شکل ۹).

برای فیثاغورثیان این شکل، نماد پویایی تولد موزون کیهان است و عشق جهانی را نشان می‌دهد. در معماری ایرانی، الگوهای اسلیمی بر اساس مارپیچ‌های بالارونده با توالی اجزاء شکل با اشاره بر ایدهٔ لایتناهی، کثرت و کنایه از آفرینش جهان، قرار دارند. حرکات هماهنگ و موزون الگوهای تکرارشوندهٔ اسلیمی بازگشت به وحدت را بیان می‌کنند (شکل ۱۰).



شکل ۸ نوتیلوس پومپیلیوس، مارپیچ میانگین زرین



شکل ۹. توزیع دانه در گل آفتاب‌گردان و میوهٔ کاج بر اساس مارپیچ زرین

شکل ۱۰. اسلیمی به عنوان مارپیچ کیهانی، سیر به سوی وحدت از طریق کثرت، مدرسهٔ چهار باغ، اصفهان، ۱۱۲۶–۱۱۱۸ ه. ق

هندسه در معماری ایرانی

معماری سنتی، کیهان را در ابعاد زمینی آن نمایش می‌دهد. در یک بنای معماری همهٔ ابعاد، هم در تمامیت آن (ارتفاع، طول و عرض) و هم در اجزاء آن (شامل الگوهای سطحی هندسی) به هم پیوسته‌اند و هرگز جدای از هندسه نیستند. از آنجایی که انسان در تناسب‌های مشترکی با طبیعت سهیم است، معمار سنتی، از هندسه برای کاوش بیشتر در پدیده‌های طبیعت استفاده می‌کند تا ذهن مکاشفه‌گر را از جهان محسوس به جهان معقول هدایت کند.

هندسه، نقشی اساسی در طراحی بناهای معماری ایرانی ایفا می‌کند. از دیدگاه عملکرد خارجی، استفاده از هندسه به عنوان هنر برای خلق اشکال، الگوها و تناسب‌های معمار بزرگ جهان را به یاد می‌آورد و صور خاصی را فرامی‌خواند. بنابراین هنر هندسه یک

عنصر کلیدی برای ایجاد ارتباط بین ساختمان و ایده‌هایی است که سازنده در ذهن داشته است. از دیدگاه عملکرد داخلی، هندسه به عنوان علم برای انتخاب ابعاد سازه‌ای مانند ارتفاع، طول و عرض ساختمان و اجزاء سازه‌ای آن بر رفتار سازه‌ای ساختمان حاکم است، رفتاری که از هندسه تبعیت می‌کند. هندسهٔ درست باعث می‌شود که ساختمان دارای رفتار مناسب و متعادل ایستا باشد. تحقیقات جامعی به جنبه‌های ماورای طبیعی (اردلان و بختیار، بختیار، بورکهارت[1]، نصر، *علم در اسلام، نظر متفکران اسلامی درباره طبیعت، نیاز به علم مقدس*) و ریاضی (بابین[2]، بوزجانی، پوپ و آکرمن[3]، حجازی، دیولافوی[4]، غیاث‌الدین، فارابی، کرسول[5]، کریچلو[6]، ۱۹۷۰ و ۱۹۷۶) معماری ایرانی اختصاص یافته‌اند که به کمک آنها می‌توان قسمتی از دانش ژرف به کار رفته در معماری سنتی ایران را آشکار کرد.

۱. هندسه در الگوها

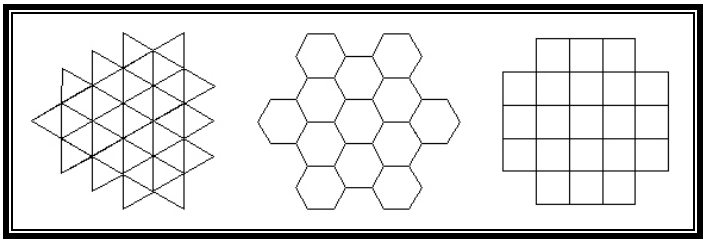
برای معمار سنتی، الگوهای هندسی مانند صورت‌های کثرت در وحدت هستند. الگوهای تکرارشونده نماد ایدهٔ لایتناهی و بی‌زمانی هستند. زیبایی و هماهنگی که در الگوهای هندسی مشاهده می‌شود، یک نظم هندسی بالاتر و عمیق‌تر، یعنی قوانین کیهانی را منعکس می‌کند. انسان روحانی درصدد کشف الگوهای هندسی به عنوان وسیلهٔ درک و رسیدن به خداوند هستند.

۲. ریاضیات الگوهای هندسی دوبعدی

در معماری ایرانی الگوهای هندسی به عنوان مفاهیم فضایی برای پر کردن سطوح، مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ الگوها یا نقش‌مایه‌ها در کنار هم رشد می‌کنند تا یک سطح را بپوشانند. اگر در نظر باشد که یک سطح مسطح با اشکال یا چندضلعی‌های منتظم پوشانده

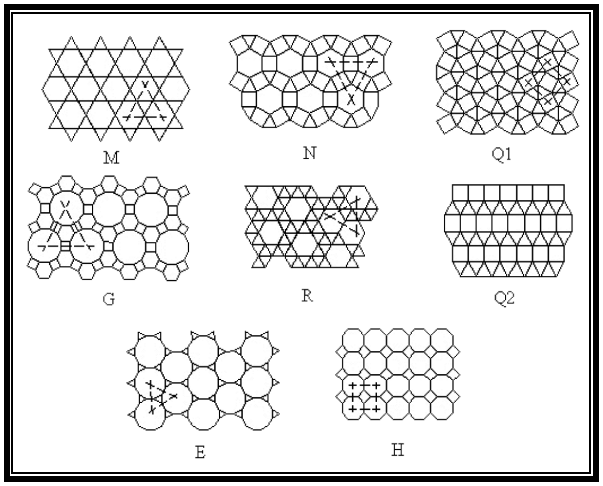
1. Burckhardt
2. Babin
3. Pope and Ackerman
4. Dieulafoy
5. Creswell
6. Kritchlow

شود، به‌طوری که هیچ فضایی بین نقاط تلاقی رئوس باقی نماند، آن چند ضلعی‌های منتظم کدامند؟ از لحاظ ریاضی می‌توان نشان داد کـه فقـط سـه چندضـلعی منـتظم، معـروف بـه الگوهای منتظم سطح مسطح، وجود دارد که یک سطح را دقیقاً پر می‌کند بـه صـورتی کـه مجموع رئوس ۳٦۰ درجه می‌شود: مثلث، مربع و شش ضلعی (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. سه الگوی منتظم که دقیقاً یک سطح دو بعدی را پر می‌کند

ترکیب‌های این سه چندضلعی منتظم تعداد هشت الگوی نیمه منتظم که در آنها رئـوس در همهٔ حالات یکسان هستند (شکل ۱۲) و تعداد ۱٤ الگوی ربع منتظم که در آنها رئـوس تغییر می‌کنند را تشکیل می‌دهد. اینها الگوهای فضا پرکن اصلی هستند که به آنها موزائیک، شبکه یا الگوی مشبک نیز گفته می‌شود(Kritchlow, 1976 and 1970).



شکل ۱۲. هشت الگوی نیمه منتظم، اقتباس از کریچلو، ۱۹۷۰ و ۱۹۷٦

فرض کنید

n = تعداد اضلاع هر چندضلعی منتظم

$\frac{n-2}{n}180^\circ$ = زاویهٔ داخلی هر رأس هر چندضلعی

$\frac{360}{((n-2)/n)180} = 2+\frac{4}{n-2}$ = تعداد چنین چند ضلعی‌هایی در هر رأس

برای داشتن یک عدد کامل برای n بزرگ‌تر از ۲ باید ٦ ،٤ ،۳ = n به ترتیب برای مثلث، مربع و شش‌ضلعی می‌توان نشان داد که دور یک رأس کمتر از سه یا بیشتر از شش چندضلعی، نمی‌تواند باشد. رابطه زیر برای چندضلعی‌های اطراف یک رأس صادق است؛

(۱) ۳≤ تعداد ممکن چندضلعی‌ها دور یک رأس≤٦

بنابراین؛

(۲) برای سه چندضلعی $(\frac{n_1-2}{n_1}+\frac{n_2-2}{n_2}+\frac{n_3-2}{n_3})180^\circ = 360^\circ$

یا

(۳) برای سه چندضلعی $\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}+\frac{1}{n_3}=\frac{1}{2}$

(٤) برای چهار چندضلعی $\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}+\frac{1}{n_3}+\frac{1}{n_4}=1$

(٥) برای پنج چندضلعی $\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}+\frac{1}{n_3}+\frac{1}{n_4}+\frac{1}{n_5}=\frac{3}{2}$

(٦) برای شش چندضلعی $\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}+\frac{1}{n_3}+\frac{1}{n_4}+\frac{1}{n_5}+\frac{1}{n_6}=2$

می‌توان دید که ۱۷راه‌حل ممکن برای اعداد کامل، همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، وجود دارد. سه‌تایی که با علامت ستاره مشخص شده‌اند، K، P و S را می‌توان حذف کرد زیرا آنها اولین و تنها حل‌های کاملاً منتظم هستند: سه شش ضلعی، چهار مربع و شش مثلث بر رأس. A، B، C، D، E و J فقط در یک نقطه اتفاق می‌افتند و یک الگوی پیوسته که یک سطح کامل را بپوشاند، تولید نخواهند کرد و بنابراین می‌توانند کم شوند. پس فقط هشت حالت باقی می‌ماند. از دیدگاه تقارن، اینها را می‌توان به هشت الگوی نیمه

منتظم که رئوس آنها در همهٔ حالات یکسان هستند (شکل ۱۲، جدول ۳) و بـه ۱٤ الگـوی ربع منتظم که در آنها رئوس تغییر می‌کنند (جدول ٤) تقسیم کرد.

جدول ۲. ۱۷ الگوی ممکن از مثلث، مربع یا شش ضلعی، اقتباس از کریچلو، ۱۹۷۰ و ۱۹۷٦

کد حرف	وجوه						کد حرف	وجوه					
	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6		n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6
A	3	7	42				*K	6	6	6			
B	3	8	24				L	3	3	4	12		
C	3	9	18				M	3	3	6	6		
D	3	10	15				N	3	4	4	6		
E	3	12	12				*P	4	4	4	4		
F	4	5	20				Q^2	3	3	3	4	4	
G	4	6	12				R	3	3	3	3	6	
H	4	8	8				*S	3	3	3	3	3	3
J	5	5	10										

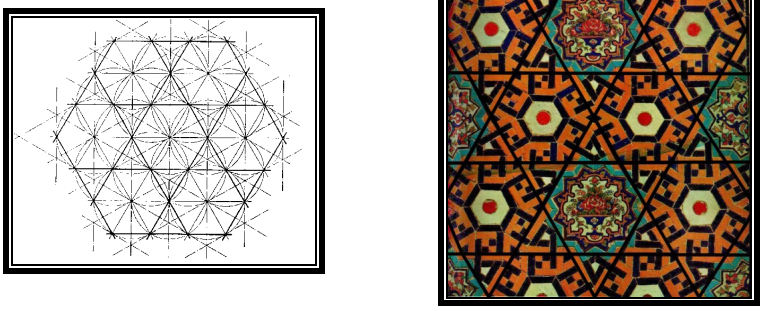
جدول ۳. هشت الگوی نیمه منتظم، اقتباس از کریچلو، ۱۹۷۰ و ۱۹۷٦

شماره جدید	کد حرف	وجوه				
		n_1	n_2	n_3	n_4	n_5
1	M	3	6	3	6	
2	N	3	4	6	4	
3	Q^1	3	3	4	3	4
4	G	4	6	12		
5	R	3	3	3	3	6
6	E	3	12	12		
7	H	4	8	8		
8	L	3	3	4	12	

جدول ٤. ١٤ الگوی ربع منتظم، اقتباس از کریچلو، ۱۹۷۰ و ۱۹۷

شماره	کد حروف*	وجوه					وجوه					وجوه					
		n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6
1	E+L	3	12	12			3	4	3	12							
2	L+(1)	3	3	4	12							3	3	3	3	3	3
3	$L+Q^1$	3	4	3	12		3	3	4	12		3	4	3	3	4	
4	N+G	6	4	3	4		12	6	4								
5	$L+Q^1+(1)$	3	3	4	12		3	4	3	3	4	3	3	3	3	3	3
6	$M+M^1$	3	6	3	6		6	6	3	3							
7	$N+Q^1$	4	3	4	6		3	4	3	3	4						
8	$N+Q^2+Q^1$	4	3	6	4		3	3	3	4	4	3	3	4	3	4	
9	$Q^1+(1)$						4	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3
10	$Q^1+(1)$						3	3	4	3	4	3	3	3	3	3	3
11	$Q^2+Q^1+(1)$	3	3	3	4	4	3	3	4	3	4	3	3	3	3	3	3
12	$Q^2+Q^1+(1)$	3	3	3	4	4	3	3	4	3	4	3	3	3	3	3	3
13	N^1+N	4	4	3	6		4	3	4	6							
14	$N+Q^2$	4	3	4	6		3	3	3	4	4						

در معماری ایرانی از الگوهای هندسی به صورت گسترده‌ای استفاده شده است. شکل ۱۳ (الف) الگوی نیمه منتظم شماره ۱ (M)، ترکیبی از مثلث‌ها و شش‌ضلعی‌ها، را نشان می‌دهد. در شکل ۱۳(ب) الگوی مشابهی در کاشی‌کاری در مسجدجامع یزد (قرن هشتم ه. ق) استفاده شده است.



(الف) (ب)

شکل ۱۳. الگوی شبکهٔ کاشی نیمه منتظم، مسجدجامع، یزد، قرن هشتم ه. ق

۳. ویژگی‌های مکانیکی الگوهای معماری ایرانی

در شکل ١٤ تزئینات کاشی (در مسجدجامع اصفهان، قرن نهم ه. ق) در(در امامزاده

اسماعیل اصفهان، قرون نهم و یازدهم ه. ق) و پنجره (در مدرسهٔ چهارباغ اصفهان، ۱۱۲٦–۱۱۱۸ه. ق) بر اساس الگوهای ریاضی نشان داده شده است. در طراحی درها و پنجره‌های چوبی، الگوهای ریاضی قادر می‌سازند که قطعات چوب به صورت اقتصادی مورد استفاده قرار گیرند و اجازه می‌دهند که کل ترکیب خود را با تغییرات درجهٔ حرارت و رطوبت تطبیق دهد. برای در کنار هم قرار دادن قطعات چوب نیازی به سیم، چسب یا پیچ نیست.

٤. ایده‌های افلاطونی در الگوهای معماری ایرانی

یادآوری می‌شود که پنج‌ضلعی، شامل نسبت زرین، شکل وجوه جسم افلاطونی ۱۲ وجهی است (شکل ۱) که نماد کیهان یا اثیر می‌باشد. پنج‌ضلعی در ارتباط متقابل با پنج‌رأسی (شکل ۳) و مارپیچ (شکل ۸) می‌باشد و همهٔ اینها نماد وجود کیهان، عشق جهانی و تجدیدحیات هستند (شکل ۱۵). این مفاهیم را می‌توان از طریق الگوهای معماری اسلامی ایران توضیح داد.

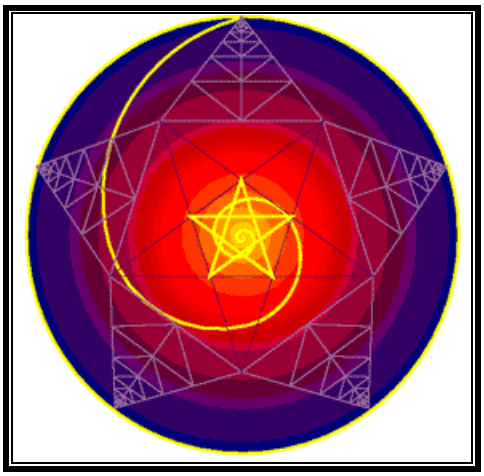
شکل ۱٦ یک ترکیب از الگوهای هندسی و خطاطی با استفاده از کاشی **در** دیواری در مسجد جامع یزد را نشان می‌دهد. همان‌طوری که کریچلو (۱۹۷٦: ۸۷) در مورد الگوی هندسی مشابهی در مسجدجامع اصفهان بیان می‌کند، این شکل ۱۰ عدد پنج ضلعی محیطی، با یک پنج‌رأسی(ستارهٔ پنج‌پر) در داخل را نشان می‌دهد که به صورت متقارن دور یک ستارهٔ ۱۰ پر قرار گرفته‌اند و پرهای این ستاره بر اساس تناسب میانگین زرین با ضلع پنج‌ضلعی مرتبط می‌باشند. نام مقدس محمد(ص)، انسان کیهانی یا الهی، حول یک ستارهٔ پنج‌پر چرخیده است.

می‌توان به عبارات کریچلو این را اضافه کرد که عدد پنج، که با ستارهٔ پنج‌پر (پنج‌رأسی) که بر روی دو پا ایستاده نشان داده شده، نماد انسان کامل است. نام محمد از پنج‌رأسی (انسان) دعوت می‌کند که به عنوان یک انسان کامل تجدیدحیات کند. عدد ۱۰، که با ۱۰ ضلعی خارج و ۱۰ رأسی(ستارهٔ ۱۰ پر) داخل نشان داده شده، نماد بازگشت به وحدت است. تمام الگو اشاره بر این دارد که آفرینش یک دگرگونی متقابل پیوسته بین

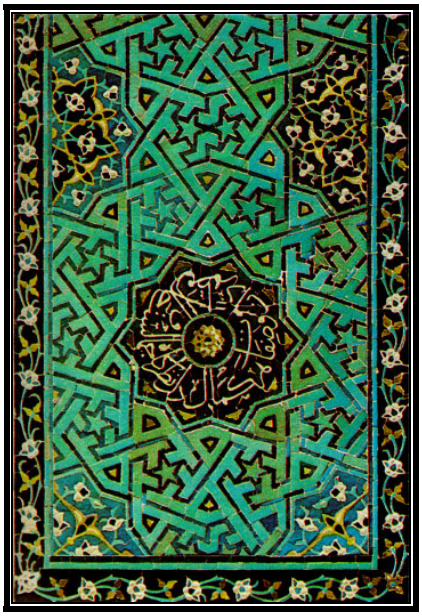
انسان الهی، ازلی و نوع بشر است. انسان الهی پیوسته منسجم می‌شود و الوهیت خود را در ماده به‌گونه‌ای منعکس می‌کند تا قابل ادراک شود. انسان فقط یک جزء تشکیل‌دهندهٔ جهان نیست، بلکه هدف اولیه و مرحلهٔ غایی آفرینش است.

(ج) (ب) (الف)

شکل ١٤. تزئین بر اساس الگوهای ریاضی: (الف) کاشی، مسجدجامع اصفهان، قرن نهم ه . ق، (ب) در، امامزاده اسماعیل، اصفهان، قرون نهم و یازدهم ه. ق، (ج) پنجره، مدرسهٔ چهار باغ، اصفهان،١١٢٦ ـ ١١١٨ه. ق



شکل ١٥. پنج‌ضلعی، پنج‌رأسی و مارپیچ همه، شامل نسبت زرین هستند و تجدیدحیات کیهانی را نشان می‌دهند.



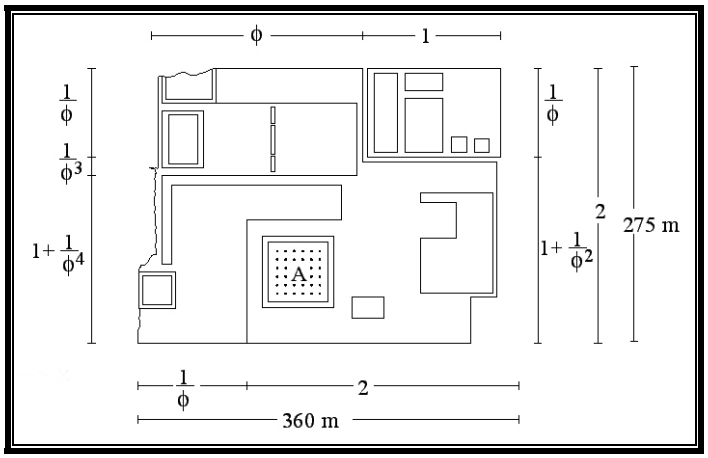
شکل ۱۶. ترکیب الگوهای هندسی و خطاطی، اشاره بر هندسهٔ مقدس و انسان کیهانی
مسجدجامع یزد، قرن هشتم ه. ق

۵. تحلیل هندسی بناهای تاریخی

تحلیل هندسی بسیاری از بناهای تاریخی ایرانی ثابت کرده است که از دانش کاملی از تناسب‌ها، به‌ویژه نسبت زرین، به‌طور وسیعی در معماری ایرانی استفاده شده و این اساس زیبایی‌شناسی ایرانی بوده است.

در بسیاری از بناهای ایرانی پلان و مقطع قائم در چارچوبی از مربع‌ها و مثلث‌های متساوی‌الاضلاع طراحی می‌شد که محل تقاطع آنها همهٔ نقاط ثابت مهم، نظیر عرض و ارتفاع درها، عرض، طول و ارتفاع سالن‌ها، موقعیت کتیبه‌ها و غیره، را مشخص می‌کرد. بنابراین، اندازهٔ هر قسمت به وسیلهٔ تناسب معینی به هر قسمت دیگر مرتبط بود. بنابراین، یک ساختمان مجموعه‌ای از اجزای غیرمتجانس نبود، بلکه ترکیبی هماهنگ و موزون از اجزای با ارتباطات متناسب بود که به فضا حرکت و به چشم آرامش می‌داد. برای مثال،

تحلیل هندسی نشان می‌دهد که دانش کاملی از نسبت زرین در پلان تخت جمشید (۳۳۰–۵۱۸ قبل از میلاد)، همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده، به کار رفته است.



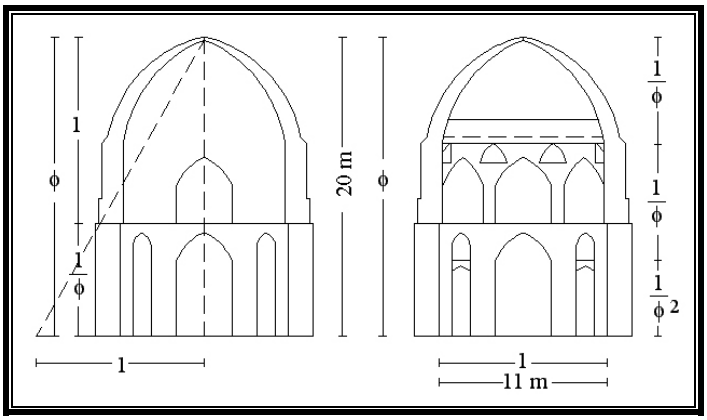
شکل ۱۷. تخت جمشید، ۳۳۰–۵۱۸ پیش از میلاد، استفاده از نسبت زرین در پلان، اقتباس از حجازی(1997:20)

نسبت زرین در طراحی هندسی گنبد تاج‌الملک مسجد جامع اصفهان (٤٨١ه. ق) به‌گونه‌ای شگفت‌آور به کار رفته است. قطر خارجی گنبد m ۱۱/۷ است. ارتفاع آن از تراز زمین m ۲۰ می‌باشد. ضخامت پوستهٔ گنبد از پایه به سمت رأس کاهش می‌یابد.

شرودر، توصیفی عالی از بنا ارائه می دهد: «[این] زیباترین سازه در ایران است.... در هر یک از این جنبه‌ها [زیبایی‌شناسی، هندسه و مکانیک] بنا جالب توجه است»(Pope,Ackerman 1938: 201) او ویژگی‌های زیبایی‌شناسی و هندسی این بنای تاریخی را به‌طور کامل تشریح می‌کند. او کاربرد استادانهٔ نسبت زرین، به‌طوری که قسمت کوچک‌تر در پایین است، را در ابعاد گنبد و گنبدخانه نشان می‌دهد. تحلیل هندسی وی اثبات می‌کند که معمار بنا یک پنج‌ضلعی، که در بین اضلاع یک مثلث متساوی‌الاضلاع بزرگ که رأس آن نوک گنبد است، رسم می‌شود، را به عنوان نمادی برای نسبت اختیار نموده است و تناسب‌های مقطع زرین ابعاد هر جزء در سازه، نظیر نوک گنبد، ارتفاع تمام

ناحیهٔ انتقال از پایه به گنبد، نوک قوس هشت‌ضلعی، نوک قوس اصلی پایینی، ارتفاع قوس‌های کناری پایینی و ارتفاع پنجره را تعیین می‌کند (شکل ۱۸(الف)). حائر اهمیت است که یکی از نقش‌مایه‌های اصلی در تزئینات آجری داخل گنبد یک مثلث و شکل لوزی است، که نقشی کلیدی برای همهٔ دستگاه تطبیق‌های هندسی بازی می‌کند.

به طریق دیگری می‌توان نشان داد که قانون نسبت زرین، به‌گونه‌ای که قسمت کوچک‌تر در بالا باشد، قابل کاربرد در سازه است. به عنوان شق دیگر اندازهٔ مستطیل زرین که مقطع قائم گنبد در آن قرار می‌گیرد می‌توانسته است به عنوان پیمون توسط معمار مورد استفاده قرار گیرد. این مستطیل زرین مشخص را می‌توان به صورت تکراری از گنبد به سوی پایه و سپس به سوی سایر اجزاء بنا ترسیم نمود؛ که از آن مارپیچ میانگین زرین تولید می‌شود (شکل ۱۸(ب)).



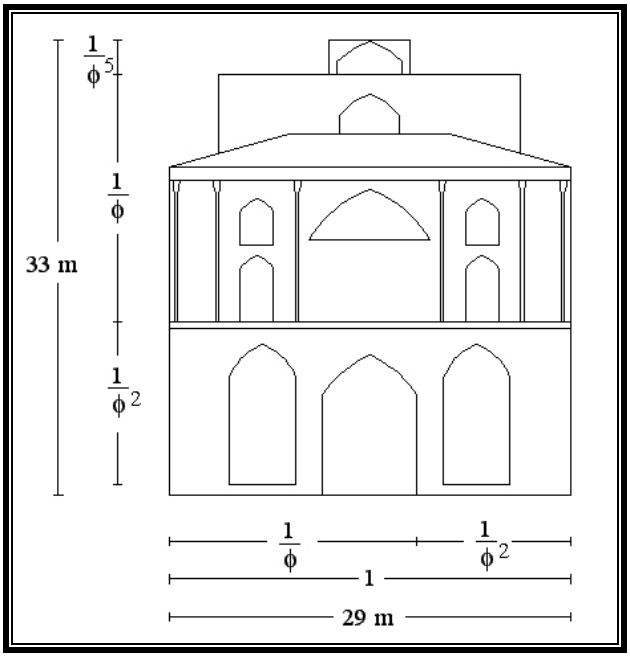
(الف) تحلیل شرودر (Pope and Ackerman, 1938: 201) (ب) پیشنهاد Hejazi, 1997: 28

شکل ۱۸. گنبد تاج‌الملک و نسبت زرین، اصفهان، ٤٨١ هجری

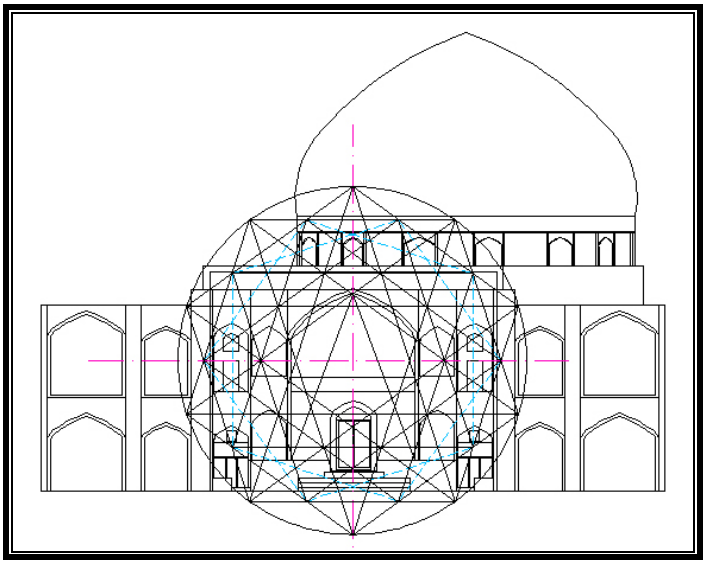
از بعد زیبایی‌شناسی، ساختمان عالی‌قاپو در اصفهان (۱۰۷۹–۱۰۰٦ه. ق) کاربرد نسبت زرین در معماری را نشان می‌دهد. در صورتی که عرض ساختمان به عنوان واحد در نظر گرفته شود، نقاط مهم نظیر گوشه‌های ورودی اصلی به ساختمان و ارتفاعات طبقات

مختلف نسبت‌هایی از نسبت زرین را به دست می‌دهند (شکل ۱۹).

تحلیل هندسی انجام گرفته توسط حاجی قاسمی (۱۳۷۵: ۳۱) در مورد مسجد شیخ لطف‌الله در اصفهان (۱۰۳۹ ـ ۱۰۱۲ه. ق)، کاربرد شگفت‌انگیز هندسه در طراحی نمای بنا را نشان می‌دهد (شکل ۲۰). در اینجا دوباره نسبت زرین (نسبت قسمت‌های مختلف در یک پنج‌ضلعی منتظم) در ساختمان قابل جستجو است. دو پنج‌ضلعی منتظم، که یک ستاره ۱۰ پر را می‌سازند، همهٔ ابعاد مهم نظیر ارتفاع و عرض در ورودی، موقعیت و ابعاد قوس‌های اصلی و جانبی، حدود ازاره و پله‌ها، ابعاد پنجرهٔ بالای در ورودی، قاب‌های کاشی‌کاری شده و خط زمین را تعیین می‌کنند.



شکل ۱۹. عالی‌قاپو، اصفهان، ۱۰۷۹–۱۰۰۶ق، استفاده از نسبت زرین، اقتباس از (Hejazi, 1997: 35)



شکل ۲۰. مسجد شیخ لطف‌الله، اصفهان، ۱۰۲۸ ـ ۱۰۰۱ ه. ق، تحلیل هندسی، اقتباس از حاجی قاسمی، ۱۳۷۵: ۳۱

٦. رابطهٔ بین هندسه و ویژگی‌های سازه‌ای

در قلمرو بناهای تاریخی ایرانی بی‌معناست اگر کیفیات سازه‌ای نظیر مقاومت، سختی و پایداری به عنوان معیارهای اصلی و تعیین‌کنندهٔ طراحی در نظر گرفته شوند. از دیدگاه یک معمار سنتی، گرچه او از نیروها، تنش‌های ایجاد شده و خرابی‌های سازه‌ای کاملاً آگاه است، محاسبهٔ تنش در درجهٔ دوم اهمیت قرار دارد. این عملکرد عناصر سازه‌ای است که از شکل کلی بنا پیروی می‌کند، همچنان‌که خود شکل بدون عملکرد درست هیچ مفهومی ندارد. هر تحلیل (تنش) سازه‌ای و بررسی و تأیید ساختمان‌های تاریخی هنگامی موجه است که فقط بخشی و در راستای تحلیل کامل ساختمان‌ها شامل ویژگی‌های هندسی، طبیعی و ماوراءالطبیعی باشد. بعید است که یک ساختمان تاریخی یافت شود که قوانین ساختمانی و طراحی سازه‌ای آن بر اساس آیین‌نامه‌های مدرن مهندسی سازه نادرست باشد. اگر قسمتی از یک ساختمان، معیوب به نظر رسد، این باید به بدفهمی از عملکرد سازه‌ای

ساختمان یا عدم‌کفایت قوانین مدرن برای ارزیابی رفتار ساختمان نسبت داده شود. تحلیل مدرن سازه‌ای بناهای تاریخی ابزار دیگری برای کشف دانش ژرف سازندگان ماهر سنتی در کارهایشان و بهبود بخشیدن به تئوری‌های مدرن سازه‌ها و بنا نهادن معیارهای طراحی نو است.

به عنوان یک اصل اساسی در هنر ساختمان‌سازی سنتی، عملکرد و پایداری یک ساختمان از هندسهٔ آن پیروی می‌کند؛ یک هندسهٔ کامل، پایداری را تضمین می‌نماید. این اصل را می‌توان در بسیاری از بناهای تاریخی ایران مشاهده کرد.

۷. طراحی بهینهٔ سازه‌های چوبی

نشان داده شده است که طراحی سازه‌ای سازهٔ چوبی بنای عالی‌قاپو به صورت نسبتاً بهینه انجام شده است و بر اساس آئین‌نامه‌های نوین، یک شاهکار است (Hejazi, 1997: 101-111). این طراحی بهینه، رابطهٔ نزدیکی با نسبت زرین به کار گرفته شده در ابعاد کل بنا دارد (شکل ۱۹).

شکل گنبدهای با مصالح بنایی بدون کشش و خمش

از گنبد تاج‌الملک با هندسهٔ شگفت‌آورش، شامل نسبت زرین و مارپیچ میانگین زرین، نام برده می‌شود که تعدادی از محققان رفتار سازه‌ای آن را با پیش‌بینی ویژگی‌های سازه‌ای استثنایی، بررسی کرده‌اند. فرشاد نشان می‌دهد که برای بارگذاری وزن ابعاد گنبد تاج‌الملک دقیقاً در فرمول‌های شکل منحنی نصف‌النهاری و تغییر ضخامت گنبدهای با مصالح بنایی بدون تنش‌های کششی و نیروهای خمشی صدق می‌کند (1997: 84). معادلات تعادل برای پوسته‌های دورانی با بار متقارن عبارت‌اند از:

$$\frac{d}{d\varphi}(rN_{\varphi}) - rN_{\theta}\cos\varphi = -p_{\varphi}rr_1 \quad (۷)$$

$$\frac{N_{\varphi}}{r_1} + \frac{N_{\theta}}{r_2} = p_r \quad (۸)$$

که در آن به ترتیب φ و θ زاویه‌های نصف‌النهاری و مداری، N_φ و N_θ نیروهای نصف‌النهاری و مداری، r شعاع دایرهٔ عمود بر محور دوران، r_1 و r_2 شعاع‌های نصف‌النهاری و محیطی، p_φ و p_r مؤلفه‌های بار خارجی بر واحد سطح در جهت‌های φ و r هستند (شکل ۲۱). برای بار وزن، یعنی p (بر واحد سطح)، N_φ همواره فشاری است، بنابراین با حذف N_θ، یعنی $N_\theta = 0$، در نواحی که ممکن است این نیرو کششی شود، روابط مربوط به تغییرات ضخامت نصف‌النهاری h و شعاع r پوسته به ترتیب خواهند شد:

$$(۹)\quad h = h_0 r^{1\backslash\nu}$$

$$(۱۰)\quad r^2 = -\frac{2A}{ph}\ln\frac{1+\sin\varphi}{\cos\varphi} + B$$

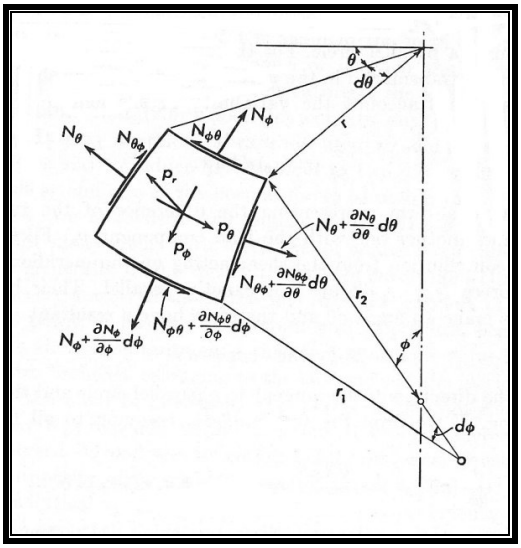
که در آن h_0 و ν ضخامت مرجع و ضریب پواسون و A و B مقادیر ثابت هستند که می‌توانند بر اساس شرایط مرزی به دست آیند. شکل منحنی نصف‌النهاری گنبد کامل از لحاظ تئوریک و شکل گنبد تاج‌الملک در شکل ۲۲ نشان داده شده‌اند. نزدیکی بین دو شکل شگفت‌آور است.

روش المان‌های محدود، وسیله‌ای برای تأیید مطالب فوق‌الذکر می‌باشد. تحلیل سازه‌ای گنبد، به روش المان‌های محدود، نشان می‌دهد که تنش‌های ناشی از دستگاه نیروهای خمشی در مقایسه با دستگاه نیروهای غشایی نه تنها برای بار وزن، بلکه برای باد و درجه حرارت و از آن مهم‌تر برای اثرات دینامیکی زلزله ناچیز و قابل اغماض‌اند (شکل ۲۳).

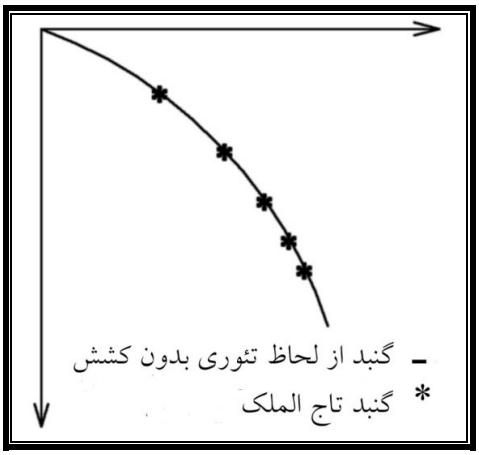
تحلیل المان‌های محدود گنبد تاج‌الملک ثابت می‌کند که اگر شکل‌های مقطع متفاوت یا تغییرات ضخامت نصف‌النهاری متفاوتی برای پوستهٔ گنبد استفاده می‌شدند، اندازهٔ تنش‌ها و نیروهای ایجاد شده در گنبد افزایش می‌یافتند و طراحی، دیگر کامل نبود.

از لحاظ زیبایی‌شناسی، هندسی، معماری و سازه‌ای گنبد تاج‌الملک گنبد ایده‌آل است. در این بنا تمایزی بین هندسه (شکل یا هنر) و ریاضیات (عملکرد سازه‌ای یا علم) وجود ندارد.

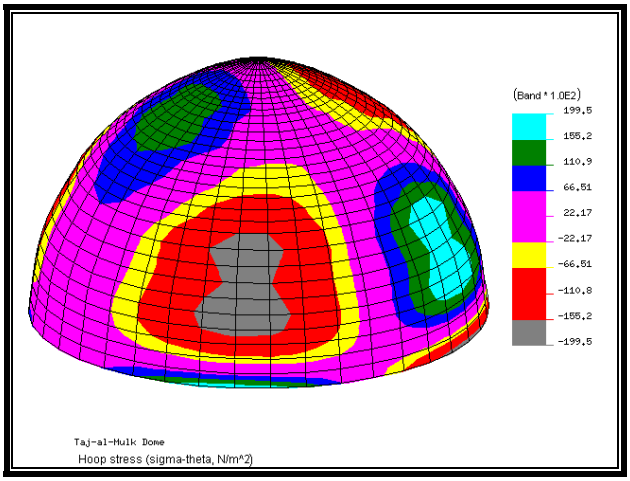
این بنا اتحاد کامل هندسه و پایداری است. در اینجا هنر و علم تبدیل به معماری می‌شوند.



شکل ۲۱. المان پوسته



شکل ۲۲. مقایسهٔ شکل منحنی نصف‌النهاری گنبد کامل از لحاظ تئوریک و شکل گنبد تاج‌الملک، اقتباس از Hejazi, 1997:65



شکل ۲۳. گنبد تاج‌الملک، تنش مداری σ_θ ناشی از بار زلزله خیلی کمتر از تنش‌های مجاز است.

۸. رابطهٔ بین نسبت زرین و الگوهای ترک در شکل‌های دایره‌ای

معماران ایرانی همواره نسبت به استفاده از شکل‌های دایره‌ای در ساختن قوس‌ها، طاق‌ها و گنبدهای باربر بی‌علاقه بوده‌اند زیرا در این شکل‌ها در یک زاویهٔ نصف‌النهاری مشخص، ترک‌های لولایی ایجاد می‌شود که به شکست و فرو ریختن سازه می‌انجامد. در مواردی که آنان از این شکل استفاده می‌کردند، شعاع شکل را در فاصله‌ای کافی قبل از زاویهٔ نصف‌النهاری ۵۱ درجه و ۵۰ دقیقه تغییر می‌دادند تا از نیروهای کششی پرهیز کنند. حل معادلهٔ تعادل برای گنبد کروی تحت بار وزن نشان می‌دهد که این زاویه‌ای است که در آنجا علامت نیروی مداری N_θ از منفی (فشاری) به مثبت (کششی) تغییر می‌کند، یعنی $N_\theta = 0$. مصالح بنایی، مقاومت کششی ندارند و بنابراین ترک در این زاویه اتفاق می‌افتد (شکل ٢٤). برای یک گنبد نیمه‌کروی با شعاع r تحت وزن p (بر واحد سطح)، می‌توان نشان داد که:

$$N_\theta = pr\frac{1-\cos\varphi-\cos^2\varphi}{1+\cos\varphi} \quad (۱۱)$$

نیروی مداری در اندازه‌ای از φ که از رابطهٔ زیر به دست می‌آید تغییر علامت می‌دهد:

$$(۱۲)\quad 1-\cos\varphi-\cos^2\varphi=0$$

که نتیجه می‌دهد:

$$(۱۳)\quad \cos\varphi=\frac{-1+\sqrt{5}}{2}=\frac{1}{\phi}$$

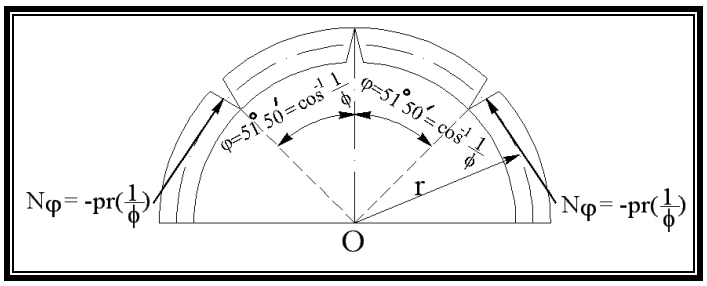
یا

$$(۱٤)\quad \varphi=51^\circ 50'$$

جالب است اگر نیروی نصف‌النهاری N_φ در این زاویه محاسبه گردد تا نشان داده شود که به‌طور معکوس با نسبت زرین متناسب است:

$$(۱۵)\quad N_\varphi=-pr\frac{1}{1+\cos\varphi}=-pr(\frac{1}{\phi})$$

این زاویه و نیروی نصف‌النهاری را می‌توان به ترتیب زاویهٔ زرین و نیروی زرین نامید. بنابراین، زاویهٔ نصف‌النهاری که بر اساس نسبت زرین تعیین می‌شود محل بحرانی برای پایداری یک گنبد کروی، یا قوس یا طاق دایره‌ای است.



شکل ٢٤. الگوی ترک ایجاد شده بر اساس نسبت زرین در یک قوس دایره‌ای تحت بار وزن

از مشاهده موارد مربوط به بنای عالی‌قاپو و گنبد تاج‌الملک می‌توان نتیجه گرفت که پایداری، رابطهٔ مستقیمی با خصوصیات هندسی یک ساختمان دارد. دوباره نسبت زرین (نسبت‌های هندسی) بر پایداری (مکانیک) تفوق دارد.

نتیجه‌گیری

سرافرازی و موفقیت معماری ایرانی به دلیل ادراک کامل آن از اهمیت اساسی استفاده از علم و هنر است. تمرین هندسهٔ مقدس، در هر دو بعد علمی و هنری، یک ویژگی ذاتی معماری ایرانی است که بر آن اساس این شیوهٔ معماری سنتی توسعه‌یافته است. معماری ایرانی آینه‌ای است که زیبایی الهی را منعکس می‌کند، آن زیبایی که خود مقدس است و به‌عنوان یک به‌هم پیوستگی هماهنگ از تناسب‌های عقلی تنها می‌تواند از طریق الگوهایی منعکس شود که دقیقاً بر اساس تناسب‌های درست ساخته شده باشند. هندسهٔ مقدس ابزار قدرتمندی است برای خلق تناسب‌های درست در معماری جهت ایجاد مطابقت بین آسمان و زمین. هندسهٔ مقدس و تناسب‌هایی که در بسیاری از اشکال حیات در طبیعت یافت می‌شوند، به طرز استادانه‌ای توسط معمار سنتی ایرانی به کار گرفته شده‌اند تا یک شیوهٔ معماری سنتی ساخته شود که حاکی از روش‌های طراحی درست و مهندسی صحیح باشد. در بسیاری از سازه‌های سنتی، هندسه، پایداری را تعیین می‌کند. معماری ایرانی هندسی کردن مقدس زیبایی الهی است.

فصل دوم

نقش سازه در هنر معماری

مقدمه

معماری سنتی دارای پیشینه‌ای چند هزار ساله در ایران می‌باشد که شاهکارهای بی‌شماری را در پهنه‌ای گسترده از سواحل مدیترانه تا مرزهای چین خلق کرده است. متخصصان بسیاری در باب معماری ایران به تحقیق و تفحص پرداخته‌اند. پوپ (۱۹۳۸ و ۱۹٦۵) مجموعه‌ای کامل از اطلاعات دربار ه معماری ایرانی از خود برجای گذاشته است. همچنین گدار (۱۹٤٦ و ۱۹٦۲)، گیرشمن (۱۹۵۱) و بسیاری پژوهشگران دیگر (زندر، ۱۹٦۸) مطالعات شایسته‌ای را در زمینهٔ تعمیر و نگهداری آثار و بناهای تاریخی ایران انجام داده‌اند که قسمتی از ویژگی‌های معماری این بناها را نمایان ساخته است. به رغم تحرک و پویایی در زمینهٔ مطالعات معماری در قرن حاضر، تلاش گسترده‌ای جهت شناخت ویژگی‌ها و رفتار مکانیکی و سازه‌ای بناها و سازه‌های تاریخی ایران تا سال ۱۳٦٦ انجام نشده بود. در سال ۱۳٦٦ حجازی و میرقادری (۱۳٦٦، ۱۳٦۷، ۱۳٦۹، ۲۰۰۵ و ۲۰۰٦) مطالعاتی را به تفصیل دربارهٔ سیستم سازه‌ای و پایداری سازهٔ چوبی بنای عالی‌قاپو به انجام رساندند. در سال ۱۳٦۸ زهرایی و اکبر (۱۳٦۸ و ۱۳٦۹) اقدام به تحقیق در زمینهٔ سیستم سازه‌ای طاق‌های

ایرانی کردند. در سال ١٣٦٩ حجازی و میرقادری مطالعات کاملی دربارهٔ رفتار سازه‌ای گنبدهای تاریخی اصفهان که بخشی از مبحث منارهای اصفهان را نیز شامل می‌شد، انجام دادند. ایشان پایداری گنبدهای یک پوسته تاج‌الملک، نظام‌الملک و شیخ لطف‌الله و گنبد دوپوستهٔ تقویت شده مسجد امام، تحت تأثیر شرایط بارگذاری گوناگون را تأئید کردند (حجازی و میرقادری، ١٣٧٠). همچنین طراحی بهینه و استثنایی گنبد تاج‌الملک را به اثبات رساندند. در سال ١٣٧٤ حجازی مدل ایده‌آل‌شده‌ای را برای آنالیز دینامیکی سازه منارجنبان ارائه کرد. ذوالانوار و حجازی در همین سال به تشریح روش ساخت و عملکرد آب‌انبارهای ایرانی، همراه با نتایج آنالیز سازه‌ای سقف مخروطی یک آب‌انبار، پرداختند و مورد اخیر بعد از پژوهش‌هایی بود که حجازی و خلاقی (١٩٩٣) در سال ١٣٧٢ دربارهٔ کارهای آبی ایران بعد از اسلام به انجام رسانده بودند. کار حجازی (١٩٩٧) در سال ١٣٧٦ اولین کتاب جامع در زمینهٔ معماری ایران بود که هر دو ویژگی‌های معماری و سازه‌ای بناهای تاریخی ایران را در یک مجموعه جا می‌داد. این اولین کار تحقیقاتی بود که در آن بناهای سنتی ایران از دیدگاه مهندسی سازه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. از سال ١٣٧٦ به مدت یک دهه مطالعات متعدد حجازی و همکاران (١٣٧٨، ١٣٧٩، ١٣٨١، ١٣٨٢، ٢٠٠٣، ١٣٨٣، ٢٠٠٤، ٢٠٠٥، ٢٠٠٦، ٢٠٠٧، ١٣٨٦ و ١٣٨٧) بر سازه‌های سنتی مختلف ایران متمرکز شد و خصوصیات ویژه آنها را نشان داد. همهٔ این مطالعات بر این دلالت دارند که هنر و علم سازه در ساختمان‌سازی سنتی ایران چیزی کامل و نتیجهٔ دانش ژرف مهندسان و سازندگان بوده است.

اصفهان در دوره‌های مختلف به عنوان مهد معماری ایرانی شهرت داشته است. به طور مثال استادانه‌ترین نمونهٔ معماری خلق شده در دوره صفویان(١١٣٥–٨٩٧ ه. ق) اصفهان است که دارای ١٦٢ مسجد، ٤٨ مدرسه، ١٨٢ کاروان‌سرا و ١٧٣ حمام بود(Pope, 1965). به لحاظ معماری اصفهان نمونهٔ غایی کاربرد شهرسازی، طراحی راه، کارهای آبی، پل‌ها و مهندسی عمران بوده است(Hejazi, 1997).

در این فصل، به منظور نشان دادن رابطه سازه و هنر معماری، نتایج حاصل از تحقیقات

بر روی تعدادی از سازه‌های تاریخی اصفهان، به عنوان نگین ارزشمند مهندسی سازه در تمدن ایرانی ـ اسلامی، ارائه می‌شود.

هنر و معماری سنتی

هنر سنتی مهم‌ترین مشخصه و دارای پایدارترین نقش در طول تاریخ ایران بوده است. همهٔ هنرهای ایرانی دارای بالاترین درجات و معیارهای زمان خود و در رابطهٔ نزدیک با زندگی بودند. پرداختن به هنر، پرداختن به دانش بود. هنرمندان ایرانی، تخصص خود را وقف یک سنت مشترک نمودند که فردیت آنها را در خود مستغرق می‌نمود. این نه کار یک هنرمند ایرانی معین، بلکه خلوص نیت و صداقت سلسله‌هایی از نسل‌های هنرمندان واجد شرایط و شایسته بود که باعث اعتبار بخشیدن به یک سنت دیرپا شد. نمونهٔ هنر برتر ایرانی، معماری ایرانی بود. دستاوردهای بزرگ معماری ایرانی نه محصول پیشامدها و نوآوری‌های ناگهانی و نه نتیجهٔ استفادهٔ ناآگاهانه از فنون بودند. عوامل ویژه‌ای وجود داشتند که به معماری ایرانی ویژگی‌های برجسته‌اش را بخشیدند.

رفتار سازه‌ای

در قلمرو بناهای تاریخی ایرانی بی‌معناست اگر پدیده‌های سازه‌ای نظیر مقاومت، سختی و پایداری به عنوان معیارهای اصلی و تعیین‌کنندهٔ طراحی در نظر گرفته شوند. از دیدگاه یک معمار سنتی، گرچه او از نیروها، تنش‌های ایجادشده و خرابی‌های سازه‌ای کاملاً آگاه است، محاسبهٔ تنش در درجهٔ دوم اهمیت قرار دارد. این عملکرد عناصر سازه‌ای است که از شکل کلی بنا پیروی می‌کند، همچنان‌که خود شکل بدون عملکرد صحیح هیچ مفهومی ندارد. هر آنالیز (تنش) سازه‌ای و بررسی و تأئید ساختمان‌های تاریخی هنگامی صحیح است که فقط بخشی و در راستای آنالیز کامل ساختمان شامل ویژگی‌های هندسی، طبیعی و ماوراءالطبیعی باشد. بعید است که یک ساختمان تاریخی یافت شود که قوانین

ساختمانی و طراحی سازه‌ای آن بر اساس آئین‌نامه‌های مدرن مهندسی سازه نادرست باشد. اگر قسمتی از یک ساختمان معیوب به نظر رسد، این باید به بدفهمی از عملکرد سازه‌ای ساختمان یا عدم‌کفایت قوانین مدرن برای ارزیابی رفتار ساختمان نسبت داده شود. آنالیز مدرن سازه‌ای بناهای تاریخی ابزار دیگری برای کشف دانش سازندگان ماهر سنتی در کارهایشان به منظور بهبود بخشیدن به نظریه‌های مدرن سازه‌ها و بنا نهادن معیارهای طراحی نو است.

معیارهای طراحی

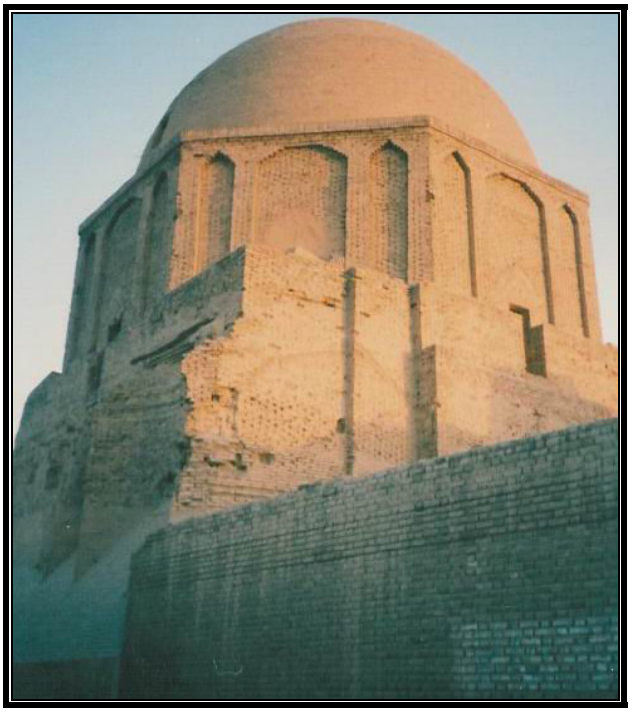
در بناهای تاریخی ایرانی معیارهای طراحی، مقاومت، سختی و پایداری نبودند، بلکه اتحاد استادانهٔ هنر و علم عملکرد کامل یک ساختمان را هم از نظر سازه‌ای و هم از نظر معماری تضمین می‌کرد؛ با یادآوری اینکه سازه و معماری یکسان بودند. معمار ایرانی دارای فهمی عمیق از طبیعت کار خود و مصالحی که استفاده می‌کرد، بود. با سنگ همیشه مانند سنگ و با آجر مانند آجر رفتار می‌شد و هرکدام در وضعیت سازه‌ای صحیح خود قرار می‌گرفت. او از آنها در انطباق با محیط استفاده می‌کرد، نه در ضدیت با طبیعت. نقش عناصر سازه‌ای استفاده از نیروهای طبیعی نظیر نور، گرما، باد و آب و نه مخالفت با آن بود و مقادیر همبستگی بر اساس مقیاس مناسب و نه ضرایب اطمینان بزرگ، در طراحی انتخاب می‌شد. به ساختمان‌ها اجازه داده می‌شد که به طور هماهنگ به عنوان یک جزء در کل عمل کند و بنابراین از تأثیرات طبیعی و مافوق‌طبیعی به طور کامل استفاده نماید. دانش هندسه، فنون مهندسی و جزئیات سازه‌ای برای یک معمار واجب بود. معمار می‌بایست با فرهنگ مکانی که در آنجا زندگی می‌کرد آشنا باشد و مجبور بود آموزش‌هایی را در استفاده از ماشین‌های به‌خصوصی داشته باشد. معمار می‌توانست همزمان یک ریاضی‌دان، یک کیمیاگر و یک شاعر باشد.

آنالیز لرزه‌ای گنبدهای تاریخی اصفهان

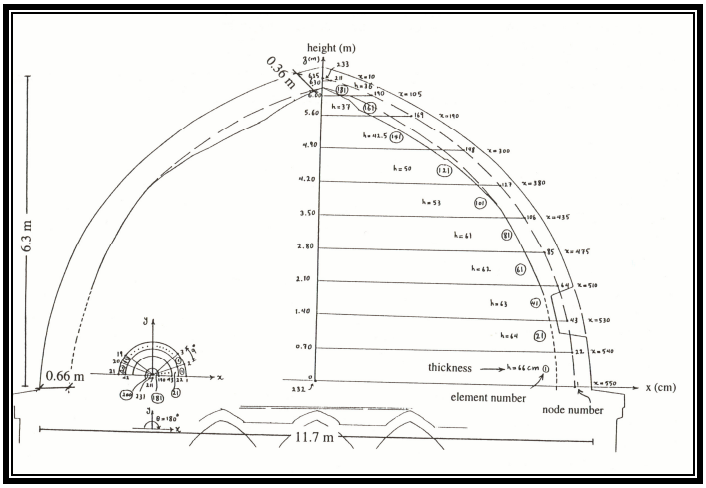
۱. توصیف گنبدهای مورد مطالعه

خصوصیات چهار گنبد تاریخی مورد مطالعه در ادامه آورده شده است. گنبدها از مصالح بنایی آجری ساخته شده‌اند.

گنبد تاج‌الملک (٤٨١ ه. ق) یک ساختمان برجسته در سمت شمالی مسجدجامع در اصفهان است. قطر خارجی آن در پایه ۱۱/۷ m است. ارتفاع آن از ترازهای پایه و زمین به ترتیب ٦/٣ m و ۲۰ m است. ضخامت تک پوسته از ۰/۳٦ m در رأس تا ۰/٦٦ m در پایه تغییر می‌کند (شکل‌های ۲۵ و ۲٦). شکل مقطع قائم گنبد ترکیبی از دو قوس بیضی متقاطع است.

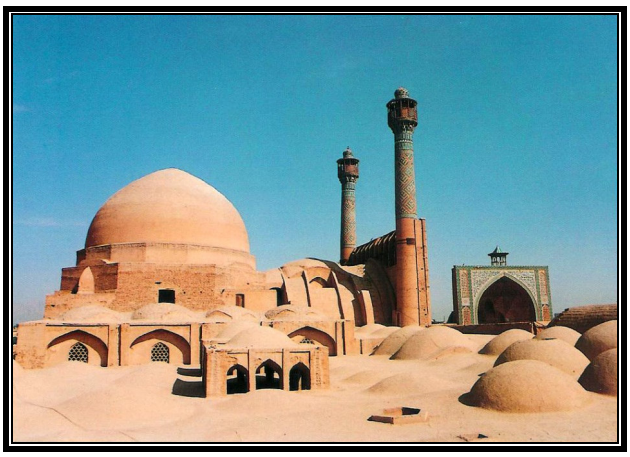


شکل ۲۵. گنبد تاج‌الملک مسجد جامع اصفهان، سال ٤٨١ ه. ق

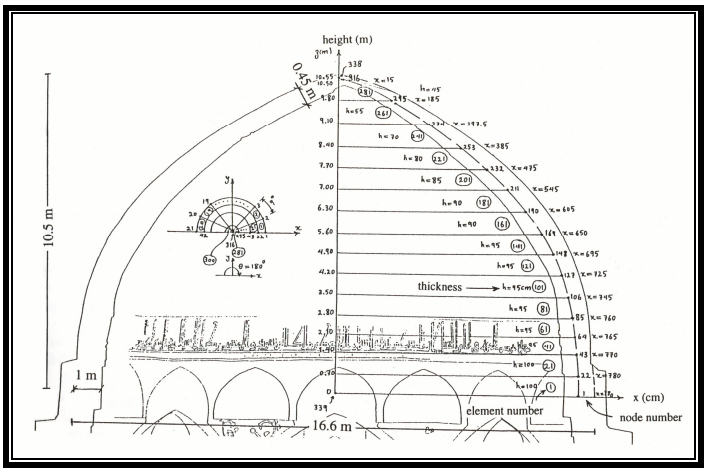


شکل ۲۶. گنبد تاج‌الملک مسجد جامع اصفهان، سال ۴۸۱ ه. ق، ابعاد و مش ایجاد شده برای آنالیز المان‌های محدود

گنبد نظام‌الملک (۴۸۵ ـ ۴۶۵ ه. ق) در سمت جنوبی مسجد جامع در اصفهان ساخته شده که در پایه، قطر خارجی گنبد ۱۶/۶ m است. ارتفاع آن از ترازهای پایه و زمین به ترتیب ۱۰/۵ m و ۲۶ m است. ضخامت تک پوسته از ۰/۴۵ m در رأس تا ۱ m در پایه تغییر می‌کند (شکل‌های ۲۷ و ۲۸). شکل مقطع قائم گنبد از تقاطع دو قوس بیضی به دست می‌آید.

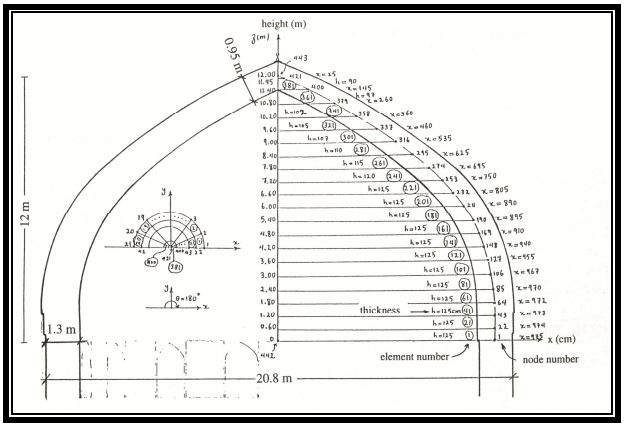


شکل ۲۷. گنبد نظام‌الملک مسجد جامع اصفهان، سال ۴۸۵ ـ ۴۶۵ ه. ق



شکل۲۸. گنبد نظام‌الملک مسجد جامع اصفهان، سال ٤٨٥ ـ ٤٦٥ هجری، ابعاد و مش ایجاد شده برای آنالیز المان‌های محدود

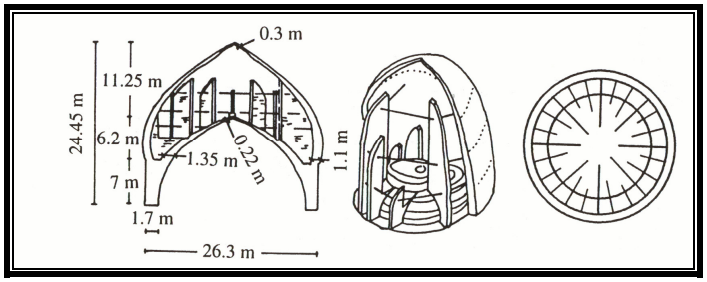
گنبد یک پوستهٔ مسجد شیخ لطف‌الله (۱۰۲۸–۱۰۱۱ ه. ق) در سمت شرقی میدان نقش‌جهان در اصفهان قرار دارد. قطر خارجی پایهٔ آن ۲۰/۸ m و ارتفاع آن از ترازهای پایه و زمین به ترتیب ۱۲ m و ۲۸/۵ m است. ضخامت پوستهٔ گنبد از ۰/۹۵ m در رأس تا ۱/۳ m در پایه تغییر می‌کند (شکل ۲۹). مقطع قائم گنبد از نوع قوس چهار پرگاره (پنج او هفت کند) است.



شکل ۲۹. گنبد شیخ لطف‌الله، اصفهان، ۱۰۲۸ ـ ۱۰۱۱ ه. ق، ابعاد و مش ایجاد شده برای آنالیز المان‌های محدود

گنبد دوپوستهٔ تقویت‌شدهٔ مسجد امام (١٠٤٨ ـ ١٠٢٠ ه. ق) در سمت جنوبی میدان نقش‌جهان در اصفهان قرار دارد. گنبد دارای آوگون، یعنی دارای پیش‌آمدگی اندکی نسبت به گریو و بر روی یک گریو بلند قرار گرفته است. قطر خارجی گریو ٢٦/٣ m است. ارتفاع گریو ٧ m و ضخامت آن در پایه و در بالا به ترتیب ١/٧ m و ٢/٢ m است. گریو دارای هشت عدد پنجره، به ارتفاع ٣/٣ m و عرض ١/٧ m است که در فواصل مساوی دور گریو قرار گرفته‌اند. ارتفاع پوسته‌های بالایی و پایینی از تراز پایهٔ گریو به ترتیب ٢٤/٤٥ m و ١٣/٢ m و فاصلهٔ بین دو پوسته ١١/٢٥ m است. پوستهٔ بالایی دارای ارتفاع ٥٢ m از تراز زمین است. ضخامت پوستهٔ پایینی از ٠/٢٢ m تا ١/٣٥ m به سمت گریو تغییر می‌کند و تغییرات ضخامت پوستهٔ بالایی از ٠/٣ m تا ١/١ m به سمت پایه است. پوستهٔ بالایی شلغمی شکل است. تعداد ٢٤ عدد دیوار (خشخاشی، تقویت‌کننده) آجری شعاعی یا نصف‌النهاری در فضای بین دو پوسته وجود دارد که به دو پوسته متصل شده‌اند. ضخامت خشخاشی‌ها ٠/٤٥ m است. خشخاشی‌ها دارای سه ارتفاع مختلف هستند. خشخاشی‌های بلند، متوسط و کوتاه به ترتیب دارای ارتفاع ١٢/٦ m، ١٠/٧ m و ٧/٦ m هستند. این خشخاشی‌ها به ترتیب و به فواصل مساوی دور محیط گنبد قرار گرفته‌اند (شکل‌های ٣٠ و ٣١). مقطع قائم دو پوسته از نوع قوس چهار پرگاره (پنج او هفت) است.

شکل ٣٠. گنبد دو پوستهٔ تقویت شدهٔ مسجد امام اصفهان



شکل ۳۱. سیستم سازه‌ای گنبد دو پوستهٔ تقویت شدهٔ مسجد امام اصفهان، سال ۱۰۴۸ ـ ۱۰۲۰ ه. ق

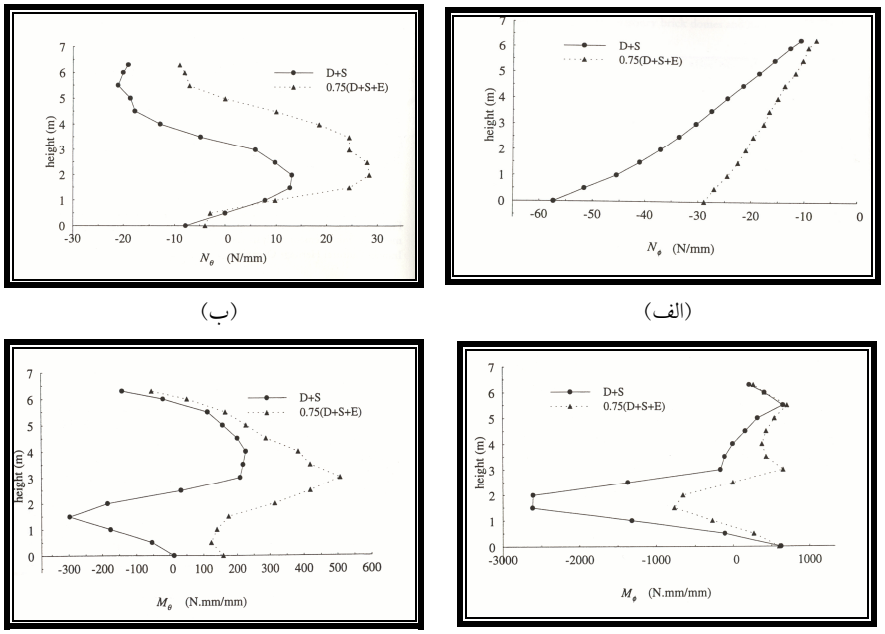
۲. روش آنالیز و فرضیه‌ها

در آنالیز این گنبدها از روش المان‌های محدود استفاده شده و المان مورد استفاده در مدل‌سازی المان پوسته بوده است. در آنالیز دینامیکی روش آنالیز تاریخچهٔ زمانی به کار برده شده است. زلزلهٔ ناغان، توصیه شده توسط آیین‌نامهٔ طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) (۱۳٦٦)، برای آنالیز تاریخچهٔ زمانی مورد استفاده قرار گرفته است. تنش‌های مجاز مصالح بنایی بر اساس آیین‌نامهٔ بارگذاری ایران (۱۳٦٥) در نظر گرفته شده‌اند.

۳. گنبد تاج‌الملک

۱. ۳. آنالیز تنش

تغییرات نیروها و مُمان‌های به‌دست آمده در طول ارتفاع گنبد در مقطع بحرانی برای تنش‌های ایجاد شده در شکل ۳۲ نشان داده شده‌اند. N_ϕ و N_θ به ترتیب نیروهای نصف‌النهاری و مداری و M_ϕ و M_θ به ترتیب مُمان‌های خمشی نصف‌النهاری و مداری هستند. مقادیر حداکثر تنش‌ها در سایر نواحی سازه از این مقادیر تجاوز نمی‌کنند.



(ب) (الف)

(د) (ج)

شکل ۳۲. تغییرات نیروها و ممان‌های خمشی در طول ارتفاع گنبد تاج‌الملک در مقطع بحرانی: (الف) N_ϕ؛ (ب) N_θ؛ (ج) M_ϕ؛ (د) M_θ؛ D= بار مرده(وزن سازه)، S= بار برف، E= بار زلزله

۲. ۳. آنالیز هندسی

آنالیز هندسی بسیاری از بناهای تاریخی ایرانی ثابت کرده که از دانش کاملی از تناسب‌ها، به‌ویژه نسبت زرین، به طور وسیعی در معماری ایرانی استفاده شده و این اساس زیبایی‌شناسی ایرانی بوده است (Hejazi, 1997). نسبت زرین نسبت منحصر به‌فرد دو قسمت است وقتی که نسبت قسمت بزرگ‌تر به قسمت کوچک‌تر مساوی نسبت کوچک‌تر به علاوهٔ قسمت بزرگ‌تر به قسمت بزرگ‌تر است که به وسیلهٔ $\phi = (\sqrt{5}+1)/2 = 1.6180339\ldots$ نشان داده می‌شود.

گنبد تاج‌الملک علاقهٔ بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. پوپ (۱۹۳۸) اولین اروپایی بود که اهمیت زیاد آن را در سال ۱۳۱۷ هجری شمسی مورد توجه قرار داد. به گفتهٔ پوپ:

این گنبد از لحاظ مکانیکی با ضرورت‌های ریاضی گنبد ایده‌آل مطابقت دارد و در نقاط حساس چنان دقتی به‌دست می‌آید که گنبد به مدل دقیق ریاضی نزدیک می‌شود.... این گنبد یک پوسته [آجری] که بدون ترک نزدیک به ۹۰۰ سال در کشوری زلزله‌خیز برجای مانده است، دلیلی بر علوم ریاضی دقیق و مکانیسم بی‌نقص آن است.... این گنبد برای ابدیت ساخته شده است (1965).

شرودر پس از توضیح کاربرد نسبت زرین در ساختمان گنبد، گنبد تاج‌الملک را با خصوصیات گنبد ایده‌آل، که از دنیسون (۱۸۷۱) گرفته شده‌اند، مقایسه کرد (Pope and Ackerman, 1938). نسبت ضخامت رأس به قطر در پایه و نسبت ضخامت رأس به ضخامت در پایه در گنبد، مانند این نسبت‌ها در گنبد ایده‌آل هستند. شیب گریو و تغییر ضخامت گریو در سازهٔ گنبد دقیقاً همان هستند که در گنبد ایده‌آل می‌باشند.

فرشاد (۱۹۷۷) نشان داد که برای بارگذاری وزن ابعاد گنبد تاج‌الملک دقیقاً با روابط ریاضی برای شکل منحنی نصف‌النهاری و تغییر ضخامت گنبدهای با مصالح بنایی بدون تنش‌های کششی و نیروهای خمشی تطبیق می‌کند (شکل ۲۲).

نهایتاً ، حجازی و میرقادری (۱۳٦۹، ۱۳۷۰، ۲۰۰۳ و ۱۳۸۳) سازهٔ گنبد را آنالیز کردند و نشان دادند که تنش‌های ایجاد شده در اثر سیستم نیروهای خمشی در مقایسه با سیستم نیروهای غشایی نه تنها برای بار وزن بلکه برای باد و مهم‌تر از آن برای اثرات دینامیکی زلزله ناچیز هستند (شکل ۲۳).

٤. گنبد نظام‌الملک

نتایج حاصل از آنالیز المان‌های محدود گنبد، نشان می‌دهد که تنش‌های ایجاد شده در گنبد کوچک‌تر از تنش‌های مجاز می‌باشند. در سازه تحت اثر بار زلزله، تنش نصف‌النهاری σ_ϕ همیشه فشاری است.

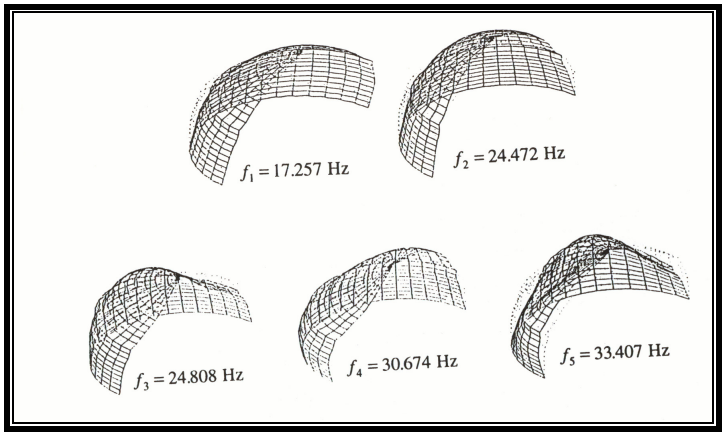
در بارگذاری زلزله، حداکثر مقدار تنش مداری کششی σ_θ برابر ٤۹٪ تنش مجاز در ٤/۲ m بالای پایه است. اندازه‌های تنش‌های برشی و تغییر مکان‌ها کوچک هستند؛ حداکثر تغییر مکان

برابر ۰/۰۰۰۱۷٦ m نزدیک رأس در جهت افقی است. پنج فرکانس اول گنبد به ترتیب برابر ۲۲/۸۵۹، ۲۹/٤۷٦، ۳۵/۸۳۳، ۳۸/۷۱۰ و ٤۲/۸٦۷ Hz است.

۵. گنبد شیخ لطف‌الله

نتایج به‌دست آمده، دلالت بر این دارد که تنش‌های ایجاد شده در گنبد تحت اثر بار زلزله از تنش‌های مجاز تجاوز نمی‌کنند. حداکثر مقادیر کششی و فشاری σ_θ به ترتیب برابر ۹۲٪ و ۵۹٪ تنش‌های مجاز در ٤/۸ m بالای پایه و در پایه است. اندازه‌های تنش‌های برشی و تغییر مکان‌ها کوچک هستند؛ حداکثر تغییر مکان برابر ۰/۰۰۰۳۹٦ m در ۵/٤ m بالای پایه در جهت افقی است.

پنج فرکانس اول گنبد به ترتیب برابر ۱۷/۲۵۷، ۲٤/٤۷۲، ۲٤/۸۰۸، ۳۰/٦۷٤ و ۳۳/٤۰۷ Hz است. پنج مود شکل اول گنبد در شکل ۳۳ نشان داده شده است.



شکل ۳۳. گنبد شیخ لطف‌الله، مود شکل‌ها

٦. گنبد مسجد امام

به منظور بررسی اثر المان‌های سازه‌ای اصلی در این گنبد، یعنی پوستهٔ بالایی، پوستهٔ پایینی و تقویت‌کننده‌های نصف‌النهاری، آنالیز برای چهار حالت زیر انجام گرفته است:

۱. پوستهٔ بالایی + گریو

۲. پوستهٔ پایینی + گریو

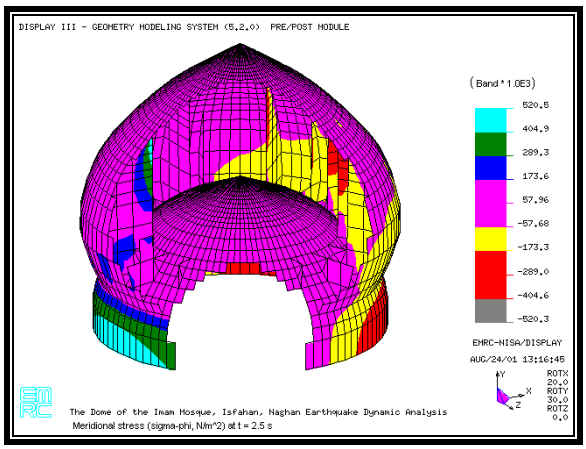
۳. پوستهٔ بالایی + پوستهٔ پایینی + گریو

٤. پوستهٔ بالایی + پوستهٔ پایینی + تقویت‌کننده‌های نصف‌النهاری + گریو(همهٔ سازه)

در حالت اول، اندازهٔ ممان خمشی M_θ در بالای محل اتصال پوستهٔ بالایی و گریو به‌طور قابل ملاحظه‌ای بزرگ است و باعث ایجاد تنش مداری σ_θ کششی می‌شود. بنابراین، قسمت پایینی پوستهٔ بالایی که آوگون است (۱۰/۳ m بالای پایهٔ گریو)، ناحیهٔ بحرانی است. در حالت دوم، تنش‌های ایجاد شده در پوستهٔ پایینی و گریو کوچک هستند. در حالت سوم، آنالیز دلالت بر این دارد که برای سازهٔ گنبد بدون تقویت‌کننده‌های نصف‌النهاری قسمت‌های بحرانی محل اتصال دو پوسته و گریو (دایرهٔ مداری ٤/۲ m بالای پایهٔ گریو) و قسمت آوگون هستند. نیروهای زلزله تنش‌هایی بزرگ‌تر از مقادیر مجاز ایجاد می‌کنند. در محل اتصال، مقادیر کششی و فشاری تنش نصف‌النهاری σ_ϕ به ترتیب ٤/٤۹ و ۱/۳۷ برابر مقادیر مجاز هستند. در قسمت آوگون، تنش مداری کششی σ_θ ایجاد شده ۱/٥٤ برابر تنش مجاز است. مقادیر تنش‌های برشی و تغییر مکان‌ها کوچک هستند.

در حالت چهارم، آنالیز نشان می‌دهد که تنش‌های کششی و ممان‌های خمشی ایجاد شده به دلیل وجود تقویت‌کننده‌های نصف‌النهاری کاهش می‌یابند. هنوز محل اتصال پوسته‌ها و گریو ناحیهٔ بحرانی است. در سازهٔ واقعی ناحیهٔ نزدیک اتصال با مصالح بنایی پر شده است. در صورتی که این مورد در مدل آنالیز شده در نظر گرفته نشود، برای بار زلزله، اندازهٔ σ_θ کششی در قسمت آوگون به ۷٤٪ مقدار مجاز کاهش می‌یابد. در محل اتصال حداکثر مقادیر کششی و فشاری σ_ϕ، که در زمان t = ۲/٥ s اتفاق می‌افتد (از ٤٤۹٪ و ۱۳۷٪) به ۲۸٤٪ و ۹۲٪ مقادیر مجاز کاهش می‌یابد (شکل ۳٤). اگر این پرشدگی به سازهٔ مدل شده اضافه شود، در محل آوگون مقدار کششی σ_θ به ٦۷٪ مقدار مجاز و اندازه‌های σ_ϕ کششی و فشاری به ترتیب به ۹۸٪ و ۷۹٪ مقادیر مجاز کاهش می‌یابد. مقادیر تنش‌های برشی و تغییر مکان‌ها کوچک هستند؛ حداکثر تغییر مکان برابر ۰/۰۰۱۲٦ m در جهت افقی نزدیک رأس می‌باشد.

پـنج فرکـانس اول سـازهٔ گنبـد بـه ترتیـب برابـر ۹/۹۷٤، ۱۰/٤۳٦، ۱۰/۹۹۳، ۱۵/۹۸۷ و ۱۷/۲۸۳ Hz است.



شکل ۳٤. گنبد مسجد امام در اصفهان، تنش نصف‌النهاری σ_ϕ در زمان t = ۲/۵ s

۷. تفسیر نتایج

از آنالیز سازه‌ای چهار گنبد نتایج زیر به‌دست می‌آید:

۱. تنش‌های ایجاد شده در همهٔ گنبدهای مطالعه شده کمتر از تنش‌های مجاز هستند.

۲. از نقطه‌نظر کم بودن تنش‌ها، گنبد تاج‌الملک استثنایی است. اندازهٔ تنش‌هـا در ایـن گنبد به طور قابل‌توجهی کوچک، کمتر از ۲۵٪ تنش‌های مجاز هستند.

۳. گنبد دو پوستهٔ تقویت‌شدهٔ مسجد امام آسیب‌پذیرترین گنبد است؛ تنش‌های ایجـاد شده در پوستهٔ بالایی نزدیک محل اتصال دو پوسته و گریو که آوگون است، بزرگ هستند.

٤. تقویت‌کننده‌های نصف‌النهاری (خشخاشی‌ها) نقـش اساسـی در پایـداری گنبـد دو پوسته بازی می‌کنند. پرشدگی بین دو پوسته برای حفظ یکپارچگی همهٔ سیستم تقویت‌شده ضروری است.

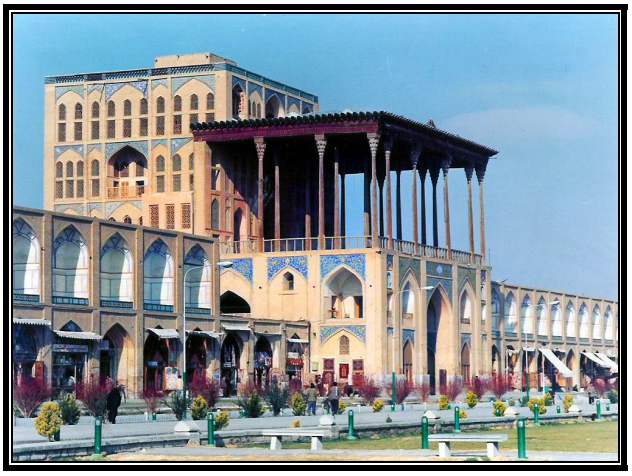
۵. برای گنبدهای امام و شیخ لطف‌الله که در آنها تنش‌های ایجـاد شـده نسـبتاً بـزرگ هستند، انجام یک آنالیز غیرخطی برای فهم بهتر رفتار دینامیکی آنها توصیه می‌شود.

٦. رفتار سازه‌ای رضایت‌بخش گنبدهای مطالعه شده در برابر اثرات زلزله دلالت بر این دارد که طراحی این گنبدها از نظر رفتار لرزه‌ای بر اساس یک بینش آگاهانه از اصول صحیح طراحی انجام گرفته است.

آنالیز سازه‌ای سازه چوبی ستون‌دار عمارت عالی‌قاپو

۱. تاریخچه بنا

عالی‌قاپو که در ضلع غربی میدان نقش‌جهان قرار دارد، در اوایل قرن یازدهم ه. ق (۱۰۷۸ ـ ۱۰۰۷ هجری) ساخته شد و ساختمان اصلی از جنس مصالح بنایی است (Pope and Ackerman, 1938). بخش چوبی شامل ستون‌ها و سقف می‌باشد که بر روی پیش‌آمدگی سمت شرقی بنا قرار دارد (شکل ۳۵).



شکل ۳۵. عالی‌قاپو، اصفهان، سال ۱۰۷۸-۱۰۰۷ ه. ق

۲. توصیف سازه ستون‌دار چوبی

سازهٔ ستون‌دار چوبی، ایوان شرقی ساختمان اصلی را می‌پوشاند. اعضای تشکیل‌دهندهٔ سازهٔ ستون‌دار چوبی عبارت‌اند از: ستون‌ها، تیرهای اصلی که با ستون‌ها در تماس‌اند، تیرهای فرعی که در بالای تیرهای اصلی یا در فاصلهٔ بین آنها واقع شده‌اند و اعضای

فشاری خرپایی که عمل انتقال بار از تیرهای فرعی به تیرهـای اصـلی را انجـام مـی‌دهنـد. قسمتی از بار وارد بر سازه به دیوار کناری کـه بـا تعـدادی از تیرهـای اصـلی و فرعـی در تماس است، منتقل می‌شود و برای جذب و انتقال نیروهای جانبی یـک سیسـتم مهاربنـدی افقی در سقف در دهانه‌های کناری بین تیرها وجود دارد. پوشش روی سازه شامل تعدادی تیرچه و تختهٔ چوبی است که امکان رفت وآمـد روی آن را فـراهم مـی‌کنـد و بـه منظـور حفاظت از برف و باران یک پوشش فلزی شیب‌دار بر روی این مجموعه قرار گرفته است. مجموعهٔ تیرها، تیرچه‌ها، اعضای خرپایی و مهاربندی افقی در فضای بـین پوشـش چـوبی قاب‌سازی زیر تیرچه‌ها و تخته‌های روی آنها، از دید پنهان بوده و وجـود شـیروانی ایجـاد فضای بستهٔ دیگری را روی این مجموعه می‌نماید (شکل‌های ۳۶ و ۳۷).

شکل ۳۶. تیرهای اصلی و فرعی چوبی در دو جهت؛ عضو مورب خرپایی روی تیر اصلی، تیرچه روی تیر فرعی، محل برخورد تیر اصلی و فرعی روی سر ستون و قاب‌سازی کف با اتصال توسط تسمه‌های آهنی در زیر مجموعه قرار دارد.

شکل ۳۷. یک خرپای چوبی

تعداد ۱۸ ستون (شکل‌های ۳۷ و ۳۸، ستون‌های α' تا $\iota\eta'$) به همراه دیوار کناری (شکل‌های ۳۸ و ۳۹(ب) قسمت هاشور خورده) وزن سقف چوبی را تحمل می‌کنند. طول این ستون‌ها ۱۰/۵ m و مقطع آنها به شکل هشت‌ضلعی منتظم، در پائین به قطر ۰/۵ m و در بالا به قطر ۰/۳ m، به صورت باریک شونده، می‌باشد و جنس آنها از چوب چنار است. تعدادی از ستون‌ها با برش طولی ستون چوبی به دو تکه و سپس خالی کردن قسمت میانی دو تکه و قرار دادن یک پروفیل فولادی قوطی‌شکل بین آنها و نصب مجدد ستون چوبی ـ فولادی، تقویت شده‌اند. ستون‌ها، روی یک کلاف چوبی قرار گرفته‌اند که در زمان مرمت بنا در داخل این کلاف تیرآهن قرار داده شده است (شکل ۳۹(ج)).

دو نمونه تیر باربر اصلی در سازه وجود دارد. یک نمونه شش عدد تیر به طول ۱۷/۵ m که یک‌سر آنها به اندازهٔ ۱/۲ m در دیوار درگیر است (شکل ۳۸، ردیف‌های(۱ ـ ۱)، (۲ ـ ۲)، (۳ ـ ۳)، (٤ ـ ٤)، (٥ ـ ٥) و (ـ ٦)، تیرهای a_7a_{10} تا f_7f_{10}). مقطع این تیرها در قسمت دیوار (شکل ۳۸، ردیف(A - A)، a_{10}) دایره‌ای به قطر ٤٠ cm و در طرف میدان (شکل ۳۸، ردیف (D - D)، a_7) دایره‌ای به قطر ٥٥ cm است. تیرها از تنهٔ درخت چنار و یک‌تکه‌اند و

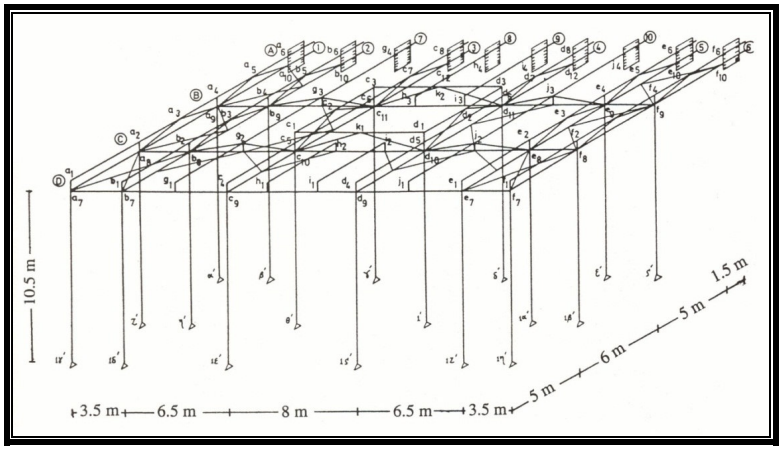
هر تیر مستقیماً به سه ستون متصل می‌شود. نمونهٔ دیگر سه عدد تیر چنار به طول ۲۸ m و به قطر ۵۰ cm است (شکل ۳۸، ردیف‌های(B - B)، (C - C) و (D - D)، تیرهای a_7f_7، a_8f_8 و a_9f_9). هر تیر متشکل از سه تکهٔ مجزاست که به یکدیگر متصل شده‌اند و این تیر روی شش ستون قرار می‌گیرد. این تیرها به تیرهای اصلی ۱۷/۵ متری متصل شده‌اند و آن تیرها هستند که با ستون‌ها در تماس‌اند (شکل ۳۶). به موازات تیرهای اصلی ۱۷/۵ متری، ۱۰ ردیف تیر فرعی باربر وجود دارد؛ شش ردیف تیر فرعی روی تیرهای ۱۷/۵ متری ردیف های (۱–۱) تا (۶–۶) (مانند تیرهای a_1a_2، a_2a_4 و a_4a_6) و چهار ردیف تیر فرعی (۷–۷) تا (۱۰–۱۰) (مانند تیرهای g_1g_2 ، g_2g_3 و g_3g_4). مقطع آنها نیم‌دایره‌ای به قطر ۲۵ cm بوده و فاصلهٔ آنها تا تیر اصلی زیرشان در حدود ۲۰ cm در قسمت نزدیک به دیوار و در طرف میدان با تیر اصلی در تماس می‌باشند. جنس تیرهای فرعی از چوب چنار است.

تعداد ۲۴ خرپای π شکل قسمتی از بار تیرهای فرعی را به تیرهای اصلی منتقل می‌کنند و جنس آنها از چوب چنار است (شکل‌های ۳۷ و ۳۸، اعضای a_8a_3، a_3a_9، a_9a_5 و...).

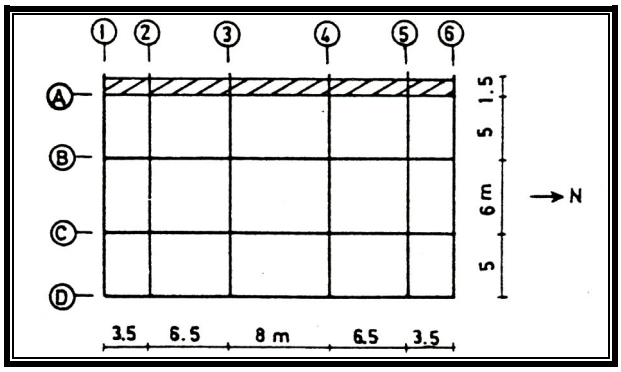
تیرچه‌هایی از جنس کبودهٔ سپیدار با شکل مقطع دایره‌ای و با قطر ۱۰ تا ۱۵ cm، بر روی تیرهای فرعی قرار گرفته‌اند. روی این تیرچه‌ها، تخته‌های کبودهٔ سپیدار با ضخامت ۳ cm قرار دارد که تمام اعضای سازه را در زیر خود پنهان می‌کند.

در دور تا دور سقف، سازه در دهانهٔ کناری یک سیستم مهاربندی افقی متشکل از تیرهای چوبی از جنس چنار با مقطع مستطیلی ۱۵×۱۰ cmبه صورت π یا × تیرهای کناری را به تیرهای مجاور متصل می‌کند. این مهاربندی، عمل انتقال بار جانبی به دیوار را انجام می‌دهد (شکل ۳۸، a_7b_8، a_8b_7، ... و شکل ۳۹ (د)). در عملیات مرمت بنا یک کابل فولادی برای انتقال نیروی جانبی به سیستم فوق‌الذکر اضافه شده است (شکل ۳۹(د)).

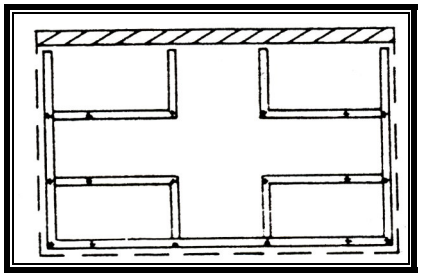
در اتصال تیرها به ستون‌ها و اعضای خرپایی و اعضای مهاربندی افقی به تیرها از میخ‌های قطور استفاده شده است. اتصال ستون‌ها به کلاف چوبی زیر آنها به صورت فاق و زبانه می‌باشد.



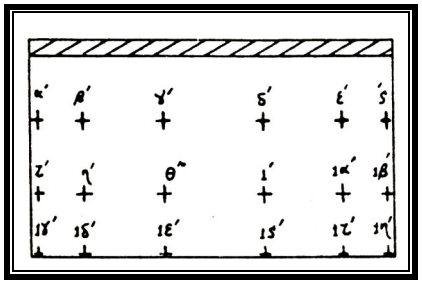
شکل ۳۸. سازهٔ چوبی پوشانندهٔ ایوان ساختمان اصلی



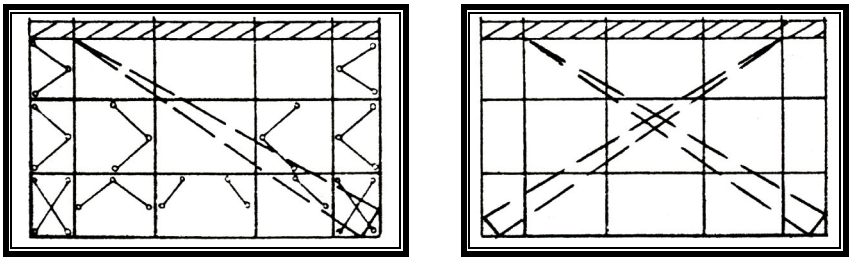
(الف)



(ب)



(ج)



(د) (ه)

شکل ۳۹. سازهٔ چوبی: (الف) پلان افقی قاب‌ها، (ب) پلان افقی ستون‌ها، (ج) پلان افقی کلاف‌های چوبی زیر ستون‌ها، (د) سیستم مهاربندی جانبی موجود، (ه) سیستم مهاربندی جانبی پیشنهادی

۳. نتایج حاصل از آنالیز و کنترل طراحی

بر اساس نتایج حاصل از آنالیز و کنترل ظرفیت سازه مشخص می‌شود که اعضای اصلی سازه یعنی ستون‌ها و تیرهای اصلی عموماً دارای ابعاد مناسب و کافی می‌باشند. دو مورد عدم‌کفایت یکی در ستون‌های دور حوض و یکی در تیرهای بین این ستون‌ها، با توجه به ضرایب اطمینان به کار رفته در محاسبات و اینکه این عدم‌کفایت در بحرانی‌ترین حالت عملکرد اتصال تیر و ستون ظاهر شده است و با در نظر گرفتن عملکرد واقعی آن و کامل کردن سطح تماس ستون‌ها با سنگ تکیه‌گاهشان از بین می‌رود، قابل‌توجیه است.

تنها موارد اشکال اساسی سازه یکی مربوط به تیرهای فرعی و تیرچه‌های روی آنهاست که دلیل بحرانی بودن تنش‌ها در برخی از تیرهای فرعی و اکثر تیرچه‌ها، نامناسب و غیریکنواخت بودن محل تماس تکیه‌گاه‌های شیروانی سقف با این اعضا می‌باشد که این امر باعث تمرکز بار بیش از حد معمول در این محل‌ها می‌شود (این شیروانی در سال‌های اخیر به سازه اضافه شده است) و دیگری مربوط به ناقص بودن مهاربندی‌های سقف است (که تعدادی از آنها در جریان تعمیرات اخیر از جای خود کنده شده‌اند).

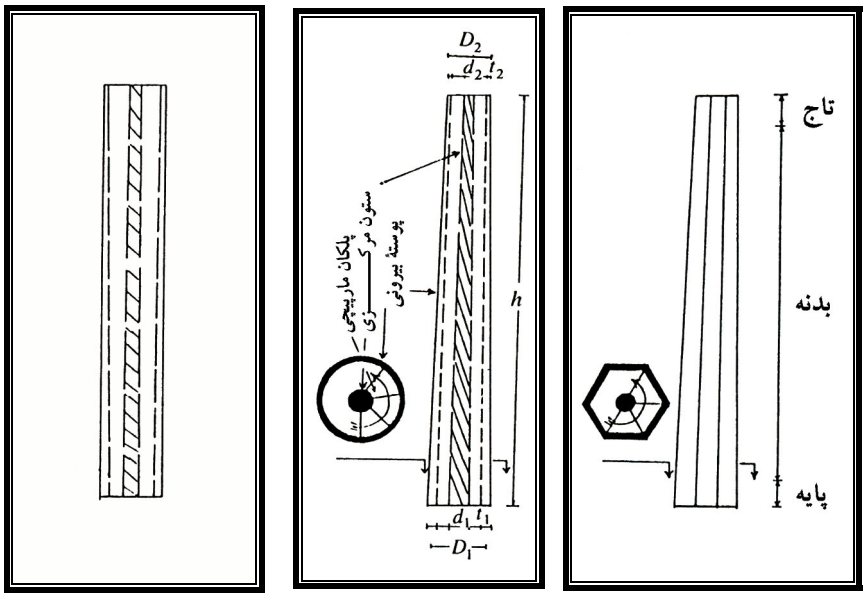
بررسی و مطالعهٔ سازهٔ ستون‌دار چوبی عمارت تاریخی عالی‌قاپو حاکی از مهارت و آشنایی مهندسان و معماران سازندهٔ آن به شیوه‌های صحیح ساختمان‌سازی است. ابعاد

انتخاب‌شده برای ستون‌ها و تیرها، مناسب‌ترین ابعاد می‌باشند. استفاده از سیستم خرپایی برای انتقال بار به سر ستون‌ها و استفاده از سیستم مهاربندی در سقف برای انتقال بار جانبی، بر آگاهی سازندگان آن به سیستم‌های مختلف انتقال بار و چگونگی توزیع نیروها در اعضای مختلف سازه دلالت می‌کند. این سازه یکی از شاهکارهای هنر ساختمان‌سازی سنتی ایران است.

آنالیز سازه‌ای منارهای اصفهان

۱. سیستم‌های سازه‌ای

به طور کلی یک منار از سه قسمت پایه، بدنه و کلاهک یا تاج تشکیل شده است (شکل ٤٠).



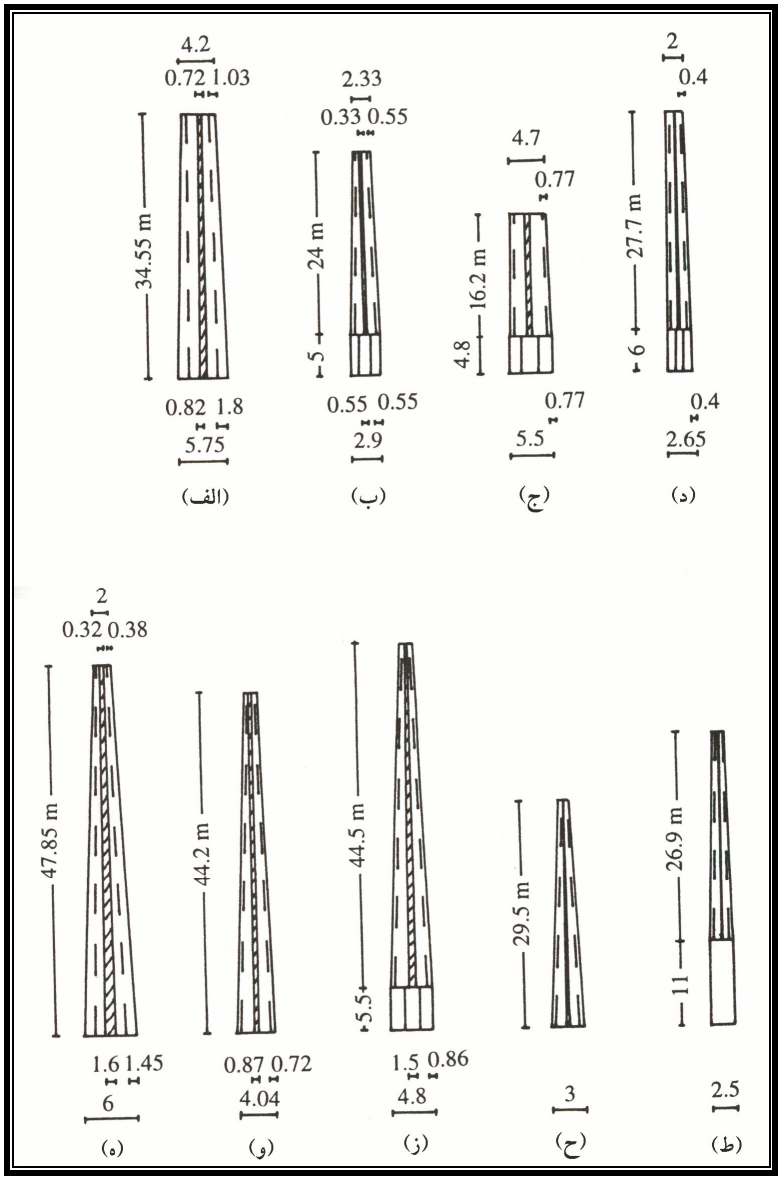
(الف) (ب) (ج)

شکل ٤٠. سه نوع منار: (الف) استوانه‌ای، (ب) مخروطی، (ج) منشوری

شکل بدنه می‌تواند به سه صورت باشد؛ استوانه‌ای (منار در گلپایگان)، مخروطی (منارهای ساربان و علی) یا منشوری (منار در مسجدجامع در نایین). بدنه شامل ستون

مرکزی، پلکان مارپیچی و پوستهٔ بیرونی می‌باشد. بدنهٔ منار ممکن است از پایه تا تاج، باریک شود. پوستهٔ بیرونی می‌تواند ضخامت ثابتی داشته یا باریک شود. ستون مرکزی باریک‌شونده شکل دایره‌ای یا چندضلعی دارد که گاه قطر آن به حدود ۱/۵ m در پایین می‌رسد. پلکان مارپیچی حول ستون میانی در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت چرخش می‌کند (شکل ٤١). تعداد کمی از منارها شبیه منارهایی که در گلپایگان (قرن ششم ه. ق)، مسجدجامع در یزد (قرن هشتم ه. ق) و مدرسهٔ خان در شیراز (قرن یازدهم ه. ق) هستند دو پلکان مارپیچ مستقل دارند. تاج در قسمت بالا شبیه یک گل نیلوفر با ارتفاع تا ۲ یا ۳ m است. ارتفاع کلی منار در بعضی موارد تا ۵۰ m می‌باشد.

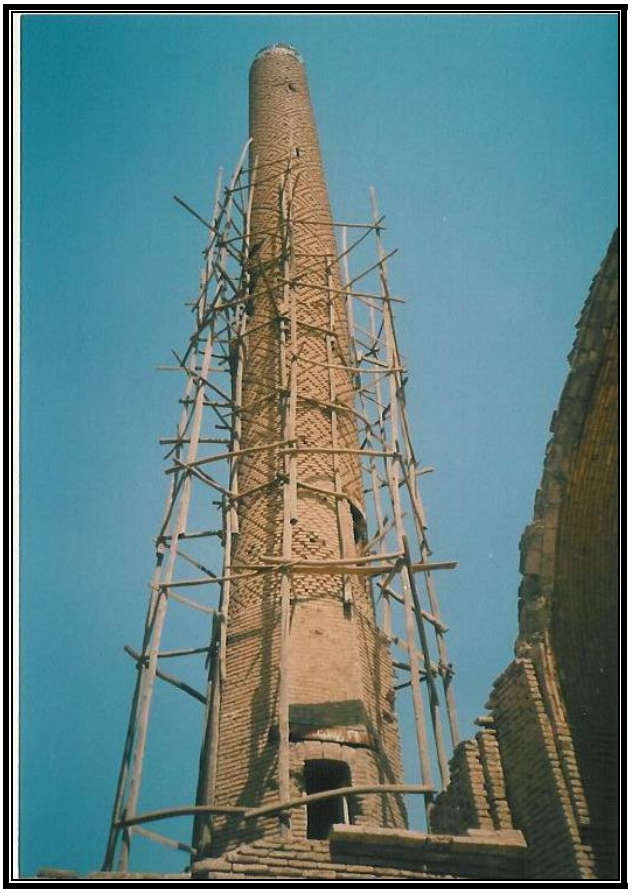
در شکل ٤١ ابعاد بعضی از مهم‌ترین منارهای آجری منفرد در اصفهان، شهر منارها، نشان داده شده است. ارتفاع از حدود ۲۰ m تا بیش از ۵۰ m تغییر می‌کند. قطر خارجی در پایه بین حدود ۲/۵ تا ٦ m و در بالا بین ۲ تا حدود ۵ m می‌باشد. ضخامت پوستهٔ بیرونی از ۰/٤ تا ۱/۸ m در پایه تا ۰/٤ تا ۱ m در بالا تغییر می‌کند. قطر ستون مرکزی از ۰/۳تا ۱/٦ m است (Hejazi, 1997).



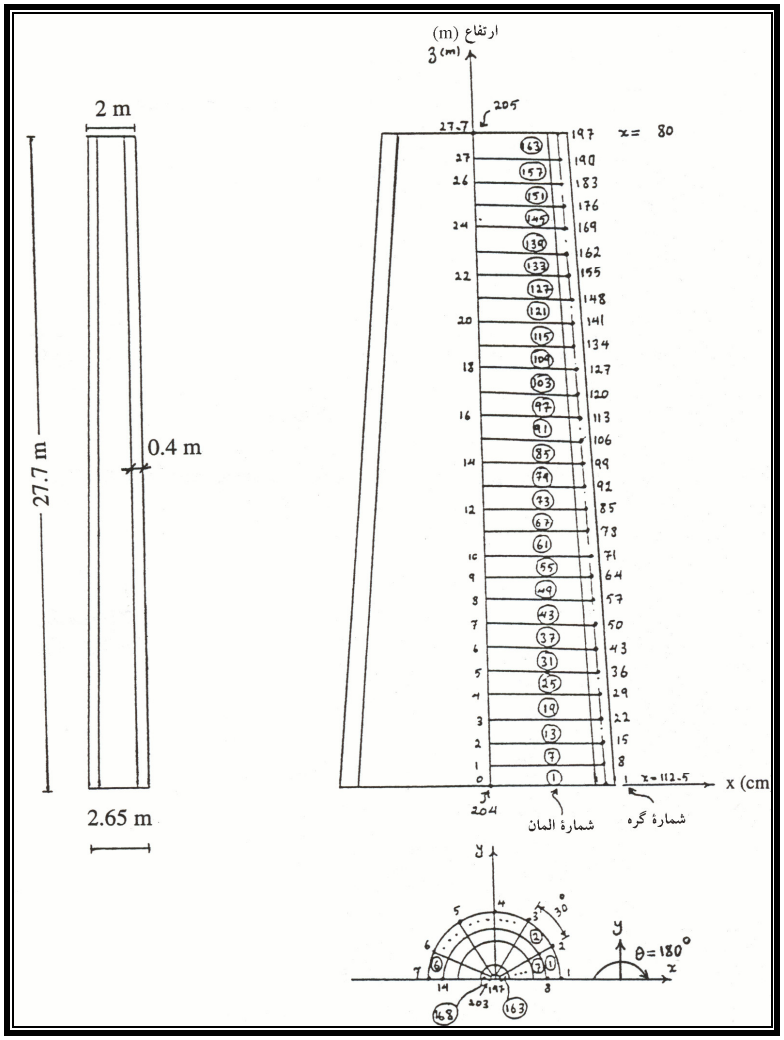
شکل ٤١. تنوع ابعاد در بعضی منارهای اصفهان: (الف) برسیان، ٤٩١ ه. ق، (ب) چهل دختران، ٥٠١ ه. ق، (ج) گار، ٥٠٥ ه. ق، (د) سین، ٥٢٦ هـ. ق، (ه) علی، قرن پنجم تا ششم ه. ق، (و) ساربان، ٥٤٩ ه. ق، (ز) زیار، قرن پنجم تا ششم ه. ق، (ح) رهروان، قرن پنجم تا ششم ه. ق، (ط) باغ قوشخانه، قرن هشتم ه. ق

۲. آنالیز سازه‌ای منار سین

منار سین یکی از قدیمی‌ترین منارهای تاریخ‌دار در ایران نزدیک اصفهان است. یک کتیبهٔ کوفی روی ساختمان نشان می‌دهد که این عمارت در ۵۲٦ ه. ق ساخته شده است. منار بر پایهٔ هشت ضلعی بلندی بنا شده است. منار ۲۷/۷ m ارتفاع دارد و مقطع آن دایره‌ای شکل است. قطر خارجی منار در پایه ۲/٦۵ m است که در تاج به ۲ m کاهش می‌یابد. ضخامت پوستهٔ بیرونی ۰/٤ m است (شکل‌های ٤۲ و ٤۳).



شکل ٤۲. منار سین، نزدیک اصفهان، سال ۵۲٦ ه. ق



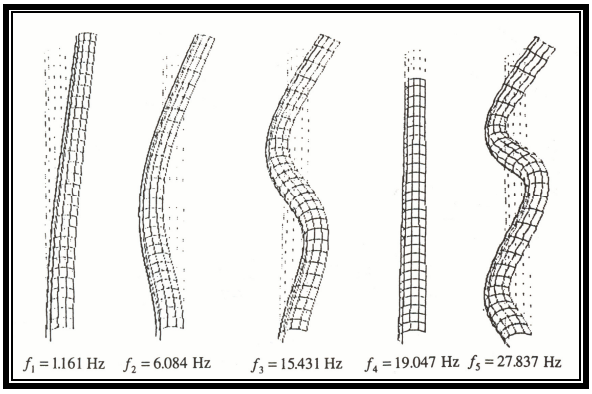
شکل۴۳. منار سین، نزدیک اصفهان، سال ۵۲۶ ه. ق، ابعاد و مش ایجاد شده برای آنالیز المان‌های محدود (Hejazi, 1997)

نتایج حاصل از آنالیز سازه‌ای منار نشان می‌دهند که تنش‌های ایجاد شده در اثر بارهای مرده و باد، در هیچ جای سازه از تنش‌های مجاز تجاوز نمی‌کنند. حداکثر مقدار تنش نصف‌النهاری، فشاری برابر ۹۳٪ مقدار مجاز در گرهٔ ۱ (در پایه) و ناشی از بارگذاری باد

می‌باشد. حداکثر مقدار تنش مداری، فشاری برابر ۹٪ مقدار مجاز در همان گره و در اثر همان بارگذاری است.

تنش‌های ایجاد شده در اثر زلزله به مراتب بزرگ‌تر از مقادیر مجاز هستند. حداکثر مقادیر کششی تنش نصف‌النهاری و تنش مداری به ترتیب ۲۲/٤۹ و ۲/۱۵ برابر مقادیر مجاز می‌باشند. پنج مود شکل اول منار در شکل ٤٤ نشان داده شده‌اند. بنابراین، منار پایداری و مقاومت خود را در برابر بارهای مرده و باد حفظ می‌کند، ولی در اثر زلزله فرو می‌ریزد.

نتایج ذکر شدهٔ فوق در ارتباط با گسیختگی به سبب اثرات دینامیکی باید با یک مدل اصلاح شده که در آن سختی پلکان مارپیچ در نظر گرفته می‌شود، مورد تأیید قرار گیرد. احتمال دارد که مدل اصلاح شده، رفتار رضایت‌بخش‌تری در مقابل زلزله از خود نشان دهد.

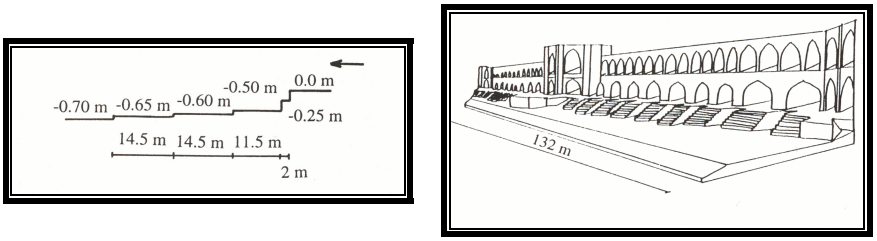


شکل ٤٤. مود شکل‌ها، منار سین (Hejazi, 1997)

پل خواجو

پل خواجو، در سال ۱۰٦۱ ه. ق ساخته شده است (Pope, 1965) (شکل ٤۵). این پل از سنگ و آجر بنا شده و ۱۳۲ m طول، ۱۲ m عرض و تعداد ۲۳ دهانه دارد. این پل همچنین می‌تواند مانند یک سد عمل کند و آب را تا ارتفاع ٦ m بالا نگه دارد. این نمونهٔ عالی از معماری آمیزه‌ای از زیبایی‌شناسی، مهندسی سازه و هیدرولیک است. به لحاظ سازه‌ای مانند

یک پل ـ سد قوسی چند دهانه با کانال‌های آبگیر (با ارتفاع ۱/۹۵ m یا ۲/٦ m و شیب بستر ۱/۵ درصد)، یک سیستم اتلاف انرژی، پایه‌هایی با شکل آیرودینامیکی و دریچه‌های تخلیه، عمل می‌کند. عرض کانال‌ها به شکل هارمونیک بر اساس نسبت زرین تغییر می‌کند. این پل احتمالاً کامل‌ترین سازهٔ هیدرولیکی شناخته شده است(Hejazi, 1997). آنالیز سازه‌ای نشان می‌دهد که این پل توانایی تحمل بارهای وارده بر خود را دارد.



(ب) (الف)

شکل ٤٥. (الف) پل خواجو، اصفهان، سال ۱۰٦۱ ه. ق، (ب) شیب کف یک کانال آبگیر؛ این پل شاهکار مهندسی سازه و هیدرولیک است (Hejazi, 1997)

نتیجه‌گیری

معماری ایرانی ـ اسلامی دربرگیرنده بخشی عظیم از میراث معماری بشری است. بناهای تاریخی موجود در ایران و به طور نمونه در اصفهان، علاوه بر ویژگی‌های معماری و تاریخی دارای خصوصیات سازه‌ای منحصر به‌فردی نیز می‌باشند. این خصوصیات سازه‌ای درآمیخته با ویژگی‌های خاص معماری این بناها می‌باشند و در واقع سازه و معماری بخش‌های تفکیک‌ناپذیر در هنر ساختمان‌سازی سنتی هستند. این بناها مجموعه‌ای از پیشرفته‌ترین ویژگی‌های مهندسی سازه و هنر معماری با بسیاری از رازهای ناگشوده‌اند که سعی در متجلی ساختن مبدأ آسمانی خود و فراهم نمودن محیطی مقدس برای انسان دارند.

منابع و مآخذ

الف. منابع فارسی

استاندارد ایران شماره ۵۱۹، *حداقل بارها روی ساختمان‌ها*. (۱۳٦۵). تهران: موسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.

آئین‌نامهٔ طراحی زلزلهٔ ساختمان‌ها، شمارهٔ۸۲ (۱۳٦٦). تهران: وزارت مسکن و شهرسازی.

بوزجانی، ابوالوفا. (۱۳٦۹). ***هندسه ایرانی کتاب تجارت***. تصحیح علیرضا جذبی. تهران: سروش.

حاجی قاسمی، کاظم. (۱۳۷۵). «**هندسه پنهان در نمای مسجد شیخ لطف الله**». ***نشریه صفه***. شماره‌های ۲۱ و ۲۲: ۲۹ ـ ۳۳.

حجازی، مهرداد و میرقادری، رسول. (۱۳٦۷). ***بررسی ایستایی عمارت ستون‌دار عالی‌قاپو***. گزارش علمی، شمارهٔ ۱۰۸. اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان.

حجازی، مهرداد و میرقادری، رسول. (۱۳٦۹). «**عمارت ستون‌دار عالی‌قاپو**». ***مجموعهٔ مقالات سومین کنفرانس مهندسی عمران***. شیراز.

حجازی، مهرداد و میرقادری، رسول. (۱۳۷۰). «**اثرات زلزله بر گنبدهای سنتی ایران**». ***مجموعهٔ مقالات اولین کنفرانس بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله***. تهران.

حجازی، مهرداد. (۱۳٦٦). «**ایستایی و مقاومت عمارت ستون‌دار چوبی عالی‌قاپو**». پایان‌نامهٔ کارشناسی. اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان.

حجازی، مهرداد. (۱۳۷۰). «**آنالیز گنبدهای ایرانی و تحقیق در هنر سنتی**». پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد. اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان.

حجازی، مهرداد. (۱۳۷۸). «**ویژگی‌های معماری وسازه‌ای بناهای تاریخی ایران**». **مجموعهٔ مقالات دومین کنگرهٔ تاریخ معماری و شهرسازی ایران**. جلد ۳، صفحهٔ ۲۹۱–۲۷۵. کرمان، فروردین ماه.

حجازی، مهرداد. (۱۳۷۸). «**هنر بدون علم هیچ است: دانش در معماری ایران**». ***مجموعهٔ مقالات همایش فلسفه و ماهیت هنر***. تهران، ۲۲–۲۱ اردیبهشت.

حجازی، مهرداد. (۱۳۷۹). «**سمبولیسم در معماری مسجد**». ***مجموعهٔ مقالات دومین همایش بین المللی معماری مسجد: افق آینده***. ج ۱: ۲٤٤ ـ ۲۳۱. کاشان، ۲۲ ـ ۲۰ مهر.

حجازی، مهرداد.(۱۳۸٦). «**تأثیر قرارگیری آجرها در رفتار سازه‌ای قوس‌های نیم دایره‌ای**». ***مجموعه مقالات سومین کنگره ملی مهندسی عمران***. دانشگاه تبریز، ۱۳ ـ ۱۱ اردیبهشت.

حجازی، مهرداد. (۱۳۸٦). «**شکل بهینه قوس‌های آجری تحت بار وزن**». ***مجموعه مقالات سومین کنگره ملی مهندسی عمران***. دانشگاه تبریز، ۱۳ ـ ۱۱ اردیبهشت.

حجازی، مهرداد، زرگر، اکبر، و زمانی فرد، علی.(۱۳۸۱). «**نگاهی به مرمت گنبد در ایران**». ***مجلهٔ اثر***. شمارهٔ ٤۳ ـ ۳۳، صفحهٔ ۲۷۷ ـ ۲۲۷.

حجازی، مهرداد، ظروفچی، صغری و کوشکی، علی.(۱۳۸۷). «**بهبود روش‌های ساخت سنتی در منطقه زاگرس، مطالعه موردی: روستای قصریان در سنندج**». ***مجموعه مقالات اولین کنفرانس بین‌المللی سکونتگاه‌های سنتی زاگرس***. سنندج، دانشگاه کردستان، ۱٤ ـ ۱۲ اردیبهشت.

حجازی، مهرداد، عزیزی، علی و یزدخواستی، مریم. (۱۳۸۲). «**فتوگرامتری برد کوتاه و نقش‌های هندسی در معماری اسلامی و بحث درمفاهیم سمبولیکی**». ***مجموعهٔ مقالات ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران***. ج ۵: ۵۸٦ ـ ۵۷۹. اصفهان، ۱۷-۱۵ اردیبهشت.

حجازی، مهرداد، فخاری تهرانی، فرهاد، آیت‌الله‌زاده شیرازی، باقر و خاتونی مقدم، نغمه.(۱۳۸٦). «**مطالعات سازه‌ای اولیه برج ۳۲ ارگ بم**». ***مجموعه مقالات سومین کنگره ملی مهندسی عمران***. دانشگاه تبریز، ۱۳ ـ ۱۱ اردیبهشت.

حجازی، مهرداد، مؤمنی، مهدی، و طلایی، سارا. (۱۳۸۱). «**تعیین انحراف قبلهٔ تعدادی از مساجد تاریخی اصفهان نسبت به قبلهٔ حقیقی**». ***مجموعهٔ مقالات نهمین کنفرانس دانشجویی عمران***. زاهدان، ٤-۱ آبان.

حجازی، مهرداد، و میرقادری، رسول. (۱۳۸۲). «**آنالیز و کنترل طراحی سازهٔ ستوندار چوبی عمارت تاریخی عالی‌قاپو**». ***مجلهٔ بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران***. ج ۱٤، شماره ۲: ۹۱-۷۷.

حجازی، مهرداد، و میرقادری، رسول. (۱۳۸۳).«**آنالیز لرزه‌ای گنبدهای تاریخی ایران**». ***مجلهٔ دانشکدهٔ فنی دانشگاه تهران***. ج ۳۸، شماره ٦: ۷۵۷ ـ ۷٤۷.

دوره آثار افلاطون، ج ۳ تیمائوس. (۱۳٦۷). ترجمه محمدحسن لطفی. تهران: گلشن.

دوره آثار افلاطون؛ج۲ جمهوری. (۱۳٦۷). ترجمه محمدحسن لطفی. تهران: گلشن.

زهرایی، محمد و اکبر، حبیب‌الله. (۱۳٦۹). «**بررسی سیستم سازه‌ای طاق‌ها و گنبدهای ایرانی**». ***مجموعهٔ مقالات سومین کنفرانس مهندسی عمران***. شیراز.

زهرایی، محمد(۱۳٦۸). «**بررسی سیستم سازه‌ای طاق‌ها و گنبدهای ایرانی**». پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد. تهران: دانشگاه صنعتی شریف.

غیاث‌الدین، جمشید بن مسعود. (۱۳٦٦). ***رساله طاق و ازج***. ترجمه علیرضا جذبی. تهران: سروش.

فارابی، محمد بن محمد. (۱۳٤۸). ***احصاءالعلوم***. ترجمه حسین خدیوجم. تهران: بنیاد فرهنگ ایران.

لولر، رابرت. (۱۳٦۸). ***هندسهٔ مقدس: فلسفه و تمرین***. ترجمه هایده معیری. تهران: علمی و فرهنگی.

نصر، سیدحسین. (۱۳٦٦). ***علم در اسلام***. ترجمه احمد آرام. تهران: سروش.

نصر، سیدحسین. (۱۳۵۹). ***علم و تمدن در اسلام***. ترجمه احمد آرام. تهران: خوارزمی.

نصر، سیدحسین. (۱۳۵۹). ***نظر متفکران اسلامی درباره طبیعت***. تهران: خوارزمی.

نصر، سیدحسین. (۱۳۷۹). ***نیاز به علم مقدس. ترجمه حسن میانداری***. تهران: مؤسسه فرهنگی طه.

ب. منابع انگلیسی

Alberti, L. B.(1987). ***The Ten Books of Architecture***. New York: Dover.

Ardalan, N. L and Bakhtiar L.(1973). ***The Sense of Unity: the Sufi Tradition in Persian Architecture***. Chicago: The University of Chicago Press.

Babin, C.(1905). **"Note sur la Metrologie et les Proportions dans les Monuments Achemenides de la Perse"**. ***Revue Archeologique*****.** 3(27). pp 347-379.

Bakhtiar, L.(1976). ***Sufi: Expressions of the Mystic Quest***. London: Thames and Hudson.

Burckhardt, T.(1976). ***Art of Islam: Language and Meaning*****.** English transl by J. P. Hobson, London: World of Islam Festival.

Creswell, K. A. C.(1914). **"Persian Domes before 1400 A.D."**, ***The Burlington Magazine***. 26. pp 146-155 and 208-213.

Denison, E. B.(1871). **"On the mathematical theory of domes"**. ***Transactions of the Royal Institute of British Architects***. Vol. 21, pp. 81-115.

Dieulafoy, C.(1883)**.** ***Revue d'Architecture et des Travaux Publiques***. Paris.

Eves, H.(1990). ***An Introduction to the History of Mathematics*****.** sixth edition, New York: Brooks Cole.

Farshad, M.(1977). **"On the Shape of Momentless Tensionless Masonry Domes".** ***Building and Environment***. Vol. 12, pp. 81-85.

Ghirshman, R.(1951). ***L'Iran des Origines a l'Islam*****.** Paris: Payot(and 3rd printing (1978) and ***Iran: from the Earliest Times to the Islamic Conquest, transl*** (1954). from the French, Penguin, Harmondsworth.

Godard, A.(1946). ***Athar-e-Iran***. Paris.

Godard, A.(1962). ***L'Art de l'Iran, Arthaud***. Paris.

Hejazi, m and Khallaghi, F. M.(1993). **"Historical Development of the Art and Science of Irrigation, Bridge and Dam Construction in the Islamic World".** ***Proceedings of the First International Congress for the Advancement of Science and Technology in the Islamic World***. Tehran.

Hejazi, m and Rahnemorfar, M.(2003). **"Synthetic Aperture Radar Interferometry Technique for the Evaluation of Earthquake Damages to Historical Structures"**. ***Proceedings of International Course on Architectural and Structural Design of Masonry***. pp. Hej-1-13, 7-18 December, Dresden.

Hejazi, M.(1997). ***Historical Buildings of Iran: their Architecture and Structure***. Southampton: Computational Mechanics Publications (WIT Press).

Hejazi, M.(2003). **"Seismic Vulnerability of Iranian Historical Domes"**. ***Proceedings of the Fourth International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures***. pp. 157-65, Ancona, Italy, 22-24 September. Southampton: WIT Press.

Hejazi, M.(2003). **"Traditional Methods for Strengthening Historical Structures in Seismic Areas"**. ***Proceddings of International Course on Architectural and Structural Design of Masonry***. pp. Hej-15-22, 7-18 December, Dresden.

Hejazi, M.(2004). **"Sacred Geometry in Nature and Persian Architecture"**. ***Proceedings of the Second International Conference on Design and Nature(DESIGN & NATURE 2004).*** pp. 25-34, Rhodes, Greece, 28-30 June, 2004. Southampton: WIT Press.

Hejazi, M.(2005). **"Geometry in Nature and Persian Architecture".** ***Building and Environment***. No. 40, pp. 1413-1427.

Hejazi, M.(2005). **"Maintenance Comments on a Persian Historical Wooden Building, Proceedings"**.***Of the Ninth International Conference on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture (STREMAH 2005*)**.**pp. 503-512, Malta, 22-24 June. Southampton: WIT Press.

Hejazi, M.(2006).**"Structural Analysis of the Wooden Structure of the Historical Building of Ali Qapu"**. ***Journal of Structural Engineering***. ASCE, Vol. 132, No. 11, pp. 1801-1805, 1 November.

Hejazi, M.(2007). **"Persian Architecture: Conformity with Nature in Hot-Dry Regions, International".** ***Journal of Design and Nature***. Vol. 1, No. 2, pp. 1-11.

Kepler, J. (1995). ***Epitome of Copernican Astronomy and Harmonies of the World***, English transl by C. G. Wallis, New York: Prometheus Books.

Kritchlow, K.(1969). ***Order in Space*****.** London: Thames and Hudson. (Viking, New York, 1970).

Kritchlow, K.(1976). ***Islamic Patterns***. London: Thames and Hudson.

Pope, A. U and Ackerman P (ed.)(1938). ***A Survey of Persian Art: from Prehistoric Times to the Present***. London and New York: Oxford University Press.

Pope, A. U.(1965). ***Persian Architecture*****.** London: Thames and Hudson (and Introducing Persian Architecture(1969). London: Oxford University Pressand 4th printing(1976).Tehran: Soroush Press).

The Oxford English Dictionary.(1989). Second edition, 20 Vols, Oxford: Clarendon Press, Oxford.

Vitruvius.(1960). ***Ten Books on Architecture***. Enlgish transl By M. H. Morgan, New York: Dover.

Zander, G.(1968). ***Travaux de Restauration de Monuments Historiques en Iran*****.** Rome: Ismeo (Istituto Italiano per il Medio ed Estremo Oriente).